

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA
PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO DE UN VEHÍCULO
EQUIPADO CON AMORTIGUACIÓN
MAGNETO-REOLÓGICA

Autor: Sergio Serena Rosell

Tutora: Dra. D^a. M^aJesús Lopez Boada

Septiembre 2011

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Objetivos del proyecto.....	12
1.3 Organización del proyecto.....	13
 CAPÍTULO 2. SISTEMA DE SUSPENSIÓN.....	 15
2.1 Sistema de suspensión en el automóvil.....	15
2.2 Elementos del sistema de suspensión.....	16
2.2.1 Conjunto elástico.....	17
2.2.1.1 Ballestas.....	17
2.2.1.2 Muelles helicoidales.....	18
2.2.1.3 Barra de torsión.....	19
2.2.2 Elementos de amortiguación.....	20
2.2.2.1 Amortiguadores de fricción.....	20
2.2.2.2 Amortiguador telescópico.....	21
2.2.2.2.1 Amortiguador monotubo.....	22
2.2.2.2.2 Amortiguador bitubo.....	22
2.2.3 Elementos constructivos.....	23
2.2.3.1 Silentblocks.....	23
2.2.3.2 Rótulas.....	24
2.2.3.3 Brazo de suspensión.....	24
2.2.3.4 Tirantes de suspensión.....	25
2.2.4 Elementos de mejora.....	25
2.2.4.1 Barras estabilizadoras.....	25
2.3 Clasificación del sistema de suspensión.....	27
2.3.1 Clasificación en función de la geometría.....	27
2.3.1.1 Suspensión rígida.....	27
2.3.1.2 Suspensión semirrígida.....	29
2.3.1.3. Suspensión independiente.....	30
2.3.2 Clasificación en función del sistema de control.....	31
2.3.2.1 Suspensión pasiva.....	32

2.3.2.2 Suspensión activa.....	32
2.3.2.3 Suspensión semiactiva.....	34
CAPÍTULO 3. REOLOGÍA.....	37
3.1 Introducción a la reología.....	37
3.2 Propiedades reológicas.....	37
3.3 Fluidos reológicos.....	39
3.3.1 Fluidos electro-reológicos.....	40
3.3.2 Fluidos magneto-reológicos.....	41
3.4 Aplicaciones de la reología en el sistema de suspensión.....	42
3.4.1 Amortiguador magneto-reológico.....	42
CAPÍTULO 4. SOFTWARE LABVIEW 2009.....	47
4.1 Introducción.....	47
4.2 Implementación código Labview 2009.....	48
4.2.1 Adquisición de señal.....	48
4.2.2 Generación de señal.....	51
CAPÍTULO 5. HARDWARE EMPLEADO.....	53
5.1 Introducción.....	53
5.2 Equipo utilizado.....	53
5.2.1 Ubicación del equipo empleado.....	55
5.3 Sensores de desplazamiento.....	56
5.3.1 Descripción de los sensores.....	56
5.3.2 Ubicación de los sensores de desplazamiento.....	58
5.4 kit controller.....	59
5.4.1 Descripción del kit controller.....	59
5.4.2 Ubicación del kit controller.....	60
5.5 Conexión entre equipos.....	61

CAPÍTULO 6. ENSAYOS.....	65
6.1 Calibración del sensor de desplazamiento.....	65
6.2 Calibración del kit controller.....	67
6.3 Descripción de los ensayos realizados.....	69
6.3.1 Ensayo sobre terreno adoquinado.....	69
6.3.2 Ensayo sobre badén.....	70
6.3.3 Ensayo sobre escalón.....	71
CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	73
7.1 Introducción.....	73
7.2 Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 20 km/h.....	74
7.2.1 Comparación del valor del Root Mean Square (RMS).....	76
7.3 Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 30 km/h.....	76
7.3.1 Comparación del valor del Root Mean Square (RMS).....	78
7.4 Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 40 km/h.....	78
7.4.1 Comparación del valor del Root Mean Square (RMS).....	80
7.5 Resultados experimentales sobre escalón.....	80
7.5.1 Comparación del valor del Root Mean Square (RMS).....	82
7.6 Resultados experimentales sobre badén.....	82
7.6.1 Comparación del valor del Root Mean Square (RMS).....	84
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	85
8.1 Conclusiones.....	85
8.2 Futuros desarrollos.....	86
ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS.....	87
A.1 Introducción.....	87
A.2 Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord.....	87
A.3 Especificaciones de los equipos de National Instruments.....	90
A.3.1 Especificaciones de NI PXI 1031DC.....	90
A.3.2 Especificaciones NI PXI 4472 B.....	92
A.3.3 Especificaciones de NI PXI 6230.....	93

A.4 Especificaciones del Kit Controller.....	94
REFERENCIAS.....	95

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Peugeot 207.....	12
Figura 2.1. Movimientos en el vehículo.....	16
Figura 2.2. Elementos de una ballesta.....	17
Figura 2.3. Características de un muelle.....	18
Figura 2.4. Diferentes resortes.....	18
Figura 2.5. Diversas posiciones del muelle.....	19
Figura 2.6. Principio de funcionamiento de una barra de torsión.....	20
Figura 2.7. Disposición y montaje de una barra de torsión.....	20
Figura 2.8. Amortiguador de fricción.....	21
Figura 2.9. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo.....	22
Figura 2.10. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo.....	23
Figura 2.11. Detalle de un silentblock.....	24
Figura 2.12. Vista en corte de una rótula.....	24
Figura 2.13. Vista en detalle de un brazo de suspensión.....	25
Figura 2.14. Principio de funcionamiento de una barra estabilizadora.....	26
Figura 2.15. Barra estabilizadora transversal.....	26
Figura 2.16. Esquema de un sistema de suspensión rígido.....	28
Figura 2.17. Suspensión dependiente tipo Hotchkiss.....	28
Figura 2.18. Suspensión dependiente: Barra Panhard.....	29
Figura 2.19. Suspensión semirrígida con eje de Dion.....	30
Figura 2.20. Esquema de suspensión independiente.....	31
Figura 2.21. Esquema de suspensión pasiva.....	32
Figura 2.22. Esquema de funcionamiento de una suspensión activa.....	33
Figura 2.23. Esquema de funcionamiento de una suspensión semiactiva.....	34
Figura 2.24. Sistema de suspensión con sistema Airmatic del Mercedes Clase E.....	35
Figura 2.25. Sistema de suspensión con sistema Four-C del Volvo S60 R.....	35
Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad del flujo.....	38
Figura 3.2. Relación entre el esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación.....	40
Figura 3.3. Distribución de partículas en un FER.....	41
Figura 3.4. Campo de velocidad en fluido magnético.....	42
Figura 3.5. Cadillac Seville STS equipado con el sistema MagneRide de Delphi... ..	43
Figura 3.6. Magnetización del fluido de MagneRide.....	44
Figura 3.7. Esquema del sistema completo MagneRide.....	44
Figura 4.1. Panel frontal Labview.....	47
Figura 4.2. Diagrama de bloques Labview.....	47
Figura 4.3. Waveform Graph.....	48
Figura 4.4. Asistente DAQ.....	49
Figura 4.5. Selección del tipo de señal.....	49
Figura 4.6. Selección de tarjeta y canal.....	49
Figura 4.7. Cuadro de ajuste DAQ.....	50
Figura 4.8. Recta de conversión V-cm.....	50
Figura 4.9. Definición gráfica adquisición de datos.....	50
Figura 4.10. Definición gráfica generación de señal.....	51
Figura 4.11. Selección canal de generación de señal.....	51

Figura 5.1. Chasis NI PXI 1031DC.....	53
Figura 5.2. Módulo NI PXI-6230.....	54
Figura 5.3. Módulo NI PXI 4472B.....	55
Figura 5.4. Ubicación equipo controlador PXI.....	55
Figura 5.5. Ubicación pantalla, teclado y ratón.....	56
Figura 5.6. Sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.....	57
Figura 5.7. Plano sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.....	57
Figura 5.8. Sensor de la suspensión derecha.....	58
Figura 5.9. Sensor de la suspensión izquierda.....	58
Figura 5.10. Lord Wonder Box device controller kit.....	59
Figura 5.11. Ubicación dispositivo controlador.....	61
Figura 5.12. Conexiones en el módulo PXI 6230.....	62
Figura 5.13. Conexionado entre equipos.....	63
Figura 6.1. Linealidad del sensor delantero derecho.....	66
Figura 6.2. Linealidad del sensor delantero izquierdo.....	67
Figura 6.3. Linealidad de la toma de datos	69
Figura 6.4. Ensayo sobre terrero adoquinado.....	70
Figura 6.5. Ensayo sobre badén.....	70
Figura 6.6. Ensayo sobre escalón.....	71
Figura 7.1. PSD del ensayo previo en badén.....	73
Figura 7.2. Comparación entre señal original y filtrado del ensayo previo en badén mediante filtro Butterflow.....	74
Figura 7.3. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-0 V.....	75
Figura 7.4. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-1 V.....	75
Figura 7.5. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-2,5 V.....	75
Figura 7.6. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-5 V.....	76
Figura 7.7. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-0 V.....	77
Figura 7.8. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-1 V.....	77
Figura 7.9. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-2,5 V.....	77
Figura 7.10. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-5 V.....	78
Figura 7.11. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-0 V.....	79
Figura 7.12. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-1 V.....	79
Figura 7.13. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-2,5 V.....	79
Figura 7.14. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-5 V.....	80
Figura 7.15. Resultados sobre escalón a 0 V.....	81
Figura 7.16. Resultados sobre escalón a 1 V.....	81
Figura 7.17. Resultados sobre escalón a 2,5 V.....	81
Figura 7.18. Resultados sobre escalón a 5 V.....	82
Figura 7.19. Resultados sobre badén a 0 V.....	83
Figura 7.20. Resultados sobre badén a 1 V.....	83
Figura 7.21. Resultados sobre badén a 2,5 V.....	83
Figura 7.22. Resultados sobre badén a 5 V.....	84
Figura A.1. Gráfica fuerza vs velocidad del amortiguador RD-1005.3.....	89
Figura A.2. Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico.....	89

ÍNDICE TABLAS

Tabla 6.1. Relación voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho.....	66
Tabla 6.2. Relación voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero izquierdo.....	67
Tabla 6.3. Relación voltaje/intensidad.....	68
Tabla 7.1. Valores RMS ensayos sobre terreno adoquinado a 20 Km/h.....	75
Tabla 7.2. Valores RMS ensayos sobre terreno adoquinado a 30 Km/h.....	78
Tabla 7.3. Valores RMS ensayos sobre terreno adoquinado a 40 Km/h.....	80
Tabla 7.4. Valores RMS ensayos sobre escalón.....	82
Tabla 7.5. Valores RMS ensayos sobre badén.....	84
Tabla 7.6. Comparación del valor RMS del amortiguador MR en los distintos ensayo.....	84
Tabla A.1. Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord.....	87

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los primeros medios de transporte que aparecieron eran vehículos de tracción animal, los cuales no disponían de ningún tipo de sistema que amortiguase las irregularidades del terreno, por lo que una de las preocupaciones de los fabricantes de carruajes fue tratar de hacer más cómodos los vehículos, adaptándolos a los tortuosos caminos empedrados por los que se circulaba en aquella época. Para reducir esas molestas vibraciones, se acolcharon los asientos y se pusieron unos resortes en el pescante del cochero. No obstante, el problema aún no se resolvía hasta que alguien tuvo la idea de colgar la cabina del carruaje, con unas correas de cuero, desde unos soportes de metal que venían de los ejes de modo que aquella quedaba suspendida por cuatro soportes y cuatro correas.

El resultado fue que aunque los golpes del rodaje eran parcialmente absorbidos por tal sistema, resultó ser una verdadera coctelera pues se mecía y bamboleaba sin control, añadiendo al relativo confort las delicias del mareo que sufrían continuamente el conductor y los ocupantes. Sin embargo, en estricto sentido, se puede decir que ahí nació el concepto de suspensión: un medio elástico que además de sostener la carrocería asimilaba las irregularidades del terreno. En la medida en que las suspensiones evolucionaron y fueron haciéndose más eficientes, las ruedas disminuyeron su tamaño.

Una suspensión actual de tipo convencional cuenta básicamente con dos elementos: un resorte (o muelle helicoidal) y un amortiguador. El resorte tiene como función principal absorber las irregularidades del terreno para que no se transmitan a la carrocería. El amortiguador a su vez, tiene la función de controlar las oscilaciones de la carrocería. Con esta combinación de elementos se logra una marcha cómoda, segura y estable, acorde con los requerimientos de los automóviles y las vías por las que se circula en la actualidad. Obviamente, los componentes mencionados no trabajan solos, pues se encuentran integrados en conjuntos mecánicos que funcionan como un equipo y que juntos constituyen el sistema denominado suspensión.

Hoy en día la ciencia avanza y los nuevos vehículos requieren sistemas de suspensión más sofisticados que hagan las delicias de sus propietarios. En este sentido, destacan las suspensiones reológicas, que se caracterizan por ser un campo novedoso y moderno, cuya inversión y evolución han experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo del presente proyecto es el estudio del comportamiento de un vehículo equipado con un sistema de suspensión semisactiva basada en el amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 de la empresa Lord (véase anexo A.2). El amortiguador a estudiar está instalado en la suspensión delantera derecha de un Peugeot 207. El estudio se realiza para el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. En la figura 1.1 se muestra la imagen de un Peugeot 207.

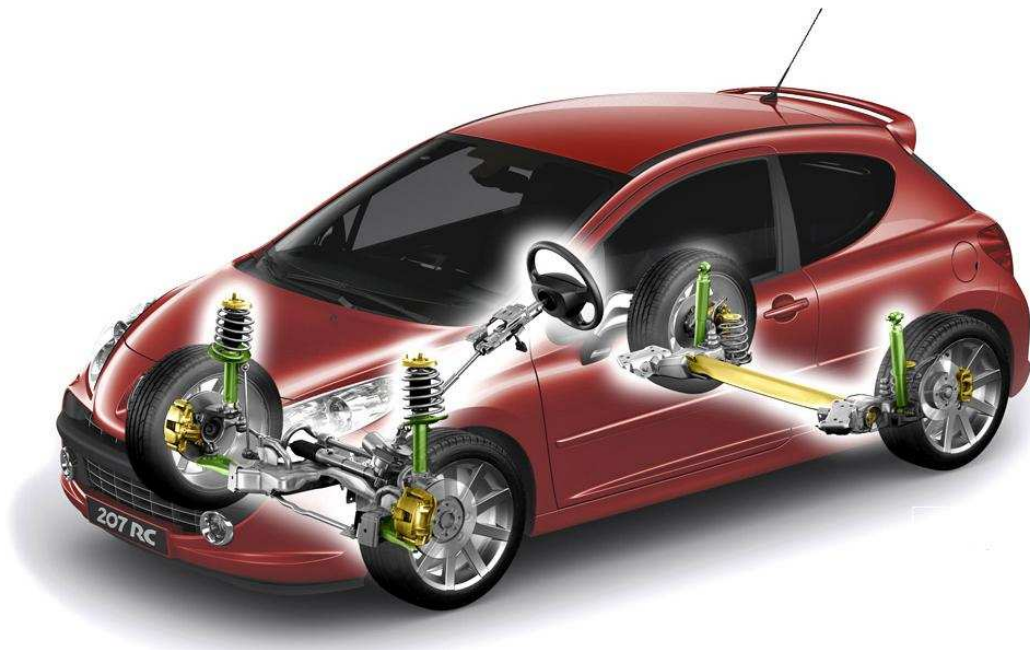


Figura 1.1. Peugeot 207.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de ocho capítulos siendo el capítulo uno la presente introducción.

En el capítulo 2, SISTEMA DE SUSPENSIÓN, se describe la evolución que ha sufrido el sistema de suspensión en la historia, así como los tipos y características de cada uno de ellos. Por otro lado se describen los distintos elementos que lo componen. Por último, se hace una clasificación de los tipos de suspensiones.

En el capítulo 3, REOLOGÍA, se realiza una introducción a los fluidos reológicos y los materiales inteligentes. Teniendo en cuenta que el presente proyecto se centra en los amortiguadores que portan fluidos magneto-reológicos, se explica sus aplicaciones actuales a la vez que se detallan sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo 4, SOFTWARE LABVIEW 2009, se describen las principales características del software empleado para la captación de datos. Al igual se realiza una breve introducción y explicación del modo de adquirir y generar señal.

En el capítulo 5, HARDWARE EMPLEADO, se describe los diferentes dispositivos utilizados para la obtención de datos, así como la ubicación de los mismos en el vehículo utilizado para realizar este proyecto.

En el capítulo 6, ENSAYOS, se explican los ensayos realizados para la posterior adquisición y tratamiento de datos. Por otro lado, se realiza la calibración de los dispositivos utilizados.

En el capítulo 7, EVALUACIÓN DE RESULTADOS, se adjuntan los datos adquiridos en los ensayos realizados, así como su posterior tratamiento.

En el capítulo 8, CONCLUSIONES, se realiza una breve conclusión de los resultados obtenidos, al igual que se exponen unos futuros estudios.

SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1 SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN EL AUTOMÓVIL

El sistema de suspensión de un automóvil es el conjunto de elementos que actúan entre los órganos no suspendidos, siendo estos ejes y ruedas, y órganos suspendidos, como el bastidor, carrocería y pasajeros [1,2].

La principal misión de la suspensión es absorber las posibles irregularidades del terreno, ayudando así a favorecer la comodidad del conductor y de los pasajeros, al mismo tiempo que garantiza la estabilidad y direccionalidad del vehículo manteniendo el contacto entre neumático y calzada ya que, las fuerzas de interacción entre estos son las únicas que permiten el control del vehículo. En el caso de que se produjera una reducción de dicho contacto, disminuiría también la capacidad de controlar el vehículo y por tanto la seguridad. El sistema de suspensión trata de hacer más confortable el habitáculo del automóvil, reduciendo las acciones a las que se encuentra sometido durante la conducción (véase figura 2.1), entre las que cabe destacar las siguientes [3,4]:

- Cabeceo: se trata de oscilaciones que se producen a lo largo de la dirección transversal del automóvil como consecuencia de frenadas o aceleraciones bruscas.
- Guiñada: son oscilaciones que se producen entorno al eje vertical del vehículo al circular por un pavimento que presenta ondulaciones.
- Balanceo: son oscilaciones que se producen entorno al eje transversal al pasar por una curva a alta velocidad.

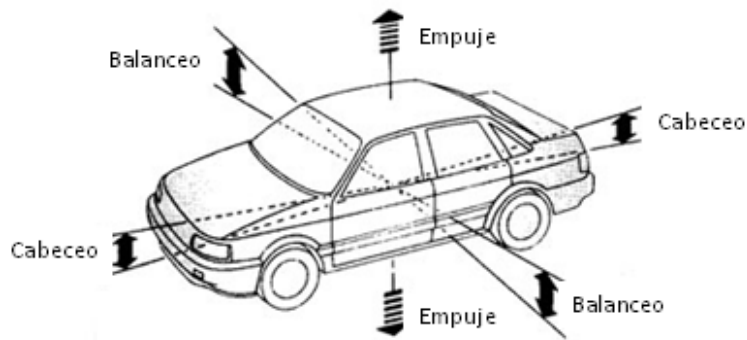


Figura 2.1. Movimientos en el vehículo.

El sistema de suspensión debe cumplir otras funciones complementarias. Estas son las siguientes [3]:

- Transmitir las fuerzas de tracción y de frenado entre los ejes y el bastidor.
- Soportar la carga del vehículo.
- Resistir el par motor y el de frenado y los efectos generados durante el paso por curva.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido, así como el paralelismo entre ejes y la perpendicularidad del bastidor.

2.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Los principales elementos del sistema de suspensión se clasifican en cuatro grandes grupos [1, 3, 8]:

- Conjunto elástico: Está formado por muelles helicoidales, ballestas o barras de torsión.
- Elementos de amortiguación.
- Elementos constructivos: En esta categoría destacan los *silentblocks*, brazos o rótulas.
- Barras estabilizadoras: Son elementos que mejoran el comportamiento de la suspensión.

2.2.1 CONJUNTO ELÁSTICO

Las funciones principales de los elementos elásticos son mejorar el confort para impedir que las irregularidades del terreno se transmitan a la carrocería, permitir el desplazamiento relativo entre el bastidor y las ruedas y soportar el peso propio del vehículo [3, 4, 5, 6]. Actualmente, los tres tipos de elementos elásticos más usados son los siguientes:

- Ballestas.
- Muelles helicoidales.
- Barras de torsión.

2.2.1.1 BALLESTAS

Las ballestas están constituidas por un conjunto de láminas de acero resistente y elástico, unidas mediante unas abrazaderas que permiten el deslizamiento entre las láminas cuando estas se deforman por el peso que soportan. La primera y más larga es la lámina maestra, cuyos extremos están curvados formando dos orificios denominados ojos, por los cuales, previo montaje de los casquillos, se une la ballesta al soporte del bastidor, por medio de bulones o pernos. Las láminas posteriores que forman la ballesta van siendo generalmente más pequeñas y curvadas. Por último, las láminas se aprietan y se unen en el centro mediante un perno “capuchino”, que consiste en un tornillo pasante con tuerca. En la figura 2.2 se pueden observar cada uno de los elementos de la ballesta.

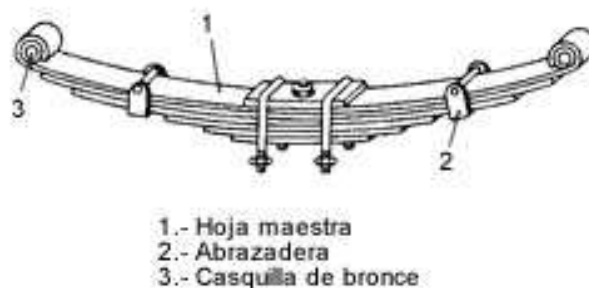


Figura 2.2. Elementos de una ballesta.

En cuanto a las ventajas que presentan las ballestas, cabe destacar algunas como su correcto funcionamiento aunque disponga de una lámina rota, su rigidez transversal y longitudinal o su posibilidad de soportar grandes pesos.

2.2.1.2 MUELLES HELICOIDALES

Los muelles helicoidales consisten en un arrollamiento en hélice de un cable de acero elástico. La flexibilidad del muelle depende del diámetro de la varilla utilizada (d), del número de espiras, del ángulo de inclinación de las mismas, del diámetro del muelle (D) y de la calidad del acero empleado para su construcción. En la figura 2.3 se observan las características de un muelle convencional.

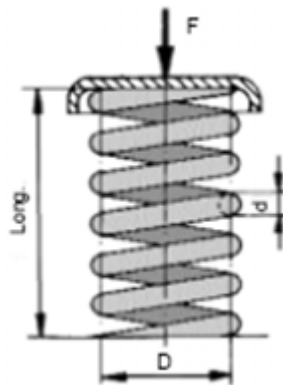


Figura 2.3. Características de un muelle.

La flexibilidad del resorte está en función del número de espiras, del diámetro del resorte, del paso entre espiras, del espesor o del diámetro de hilo. Tal y como se observa en la figura 2.4, se pueden conseguir muelles con una flexibilidad progresiva, usando diferentes diámetros de enrollado por medio de muelles helicoidales cónicos (a), por medio de muelles con paso variable entre espiras (b) o disponiendo de muelles adicionales(c).

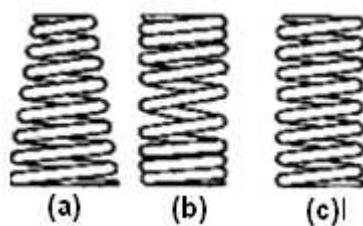


Figura 2.4. Diferentes resortes: (a)Cónico. (b)Paso variable entre espiras. (c)Normal.

Cuando el vehículo circula en vacío, sólo trabaja el muelle principal (véase figura 2.5) y cuando la carga es capaz de comprimir el muelle hasta hacer tope con el auxiliar se tiene un doble resorte, que, trabajando conjuntamente, soporta la carga sin aumentar la deformación, dando mayor rigidez al conjunto. Las espiras de un muelle helicoidal no deben, en su función elástica, hacer contacto entre sus espiras; es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras. De ocurrir lo contrario, cesa el efecto del muelle y entonces las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis.

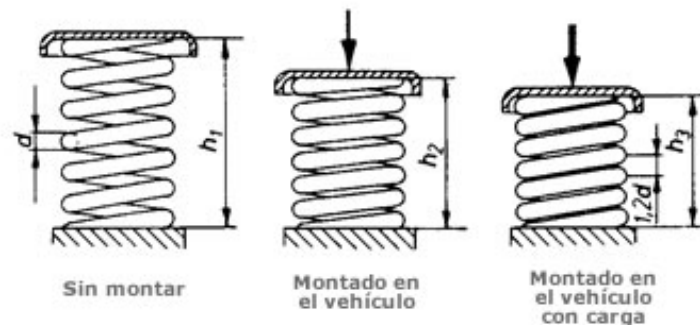


Figura 2.5. Diversas posiciones del muelle.

Algunas de las ventajas que presentan los muelles helicoidales son su innecesario mantenimiento, su protección ante la corrosión y su poco peso. Actualmente, los muelles helicoidales son los elementos elásticos más utilizados en suspensiones independientes.

2.2.1.3 BARRA DE TORSIÓN

Las barras de torsión se basan en el principio de que si a una varilla de acero elástico sujeta por uno de sus extremos se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su elasticidad cuando cesa el esfuerzo de torsión. La figura 2.6 muestra esquemáticamente una barra de torsión.



Figura 2.6. Principio de funcionamiento de una barra de torsión.

El montaje de estas barras sobre el vehículo se realiza fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de forma que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda. Cuando la rueda suba o baje por efecto de las desigualdades del terreno, se producirá en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

Las barras de torsión se pueden disponer paralelamente al eje longitudinal del bastidor o también transversalmente a lo largo del bastidor (véase figura 2.7).

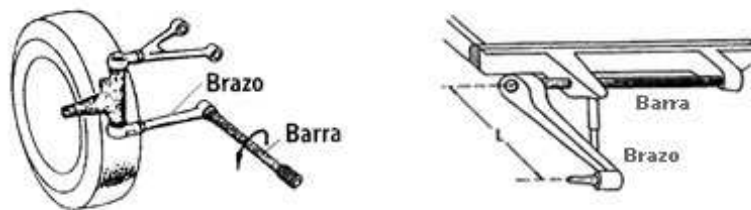


Figura 2.7. Disposición y montaje de una barra de torsión.

2.2.2 ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN

Los elementos de amortiguación son los encargados de frenar el número de oscilaciones, su amplitud y la frecuencia entre estas, producidos por los elementos elásticos [6]. Los amortiguadores que se detallarán a continuación son los de fricción y el telescópico que engloba al amortiguador monotubo y al bitubo.

2.2.2.1 AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN

Los amortiguadores de fricción, que se usan muy poco en la actualidad, basan su funcionamiento en la disipación de la energía en forma de calor que se produce con el rozamiento de discos de fricción. Están compuestos por dos brazos formados por dos

o más discos de acero que se reúnen alternados en un eje común. Uno de los dos brazos se enlaza a la rueda y el otro al bastidor, de manera que con las oscilaciones del elemento elástico se pueda producir el frotamiento entre los discos que genera la acción de frenado. La figura 2.8 muestra un amortiguador de fricción común [5].

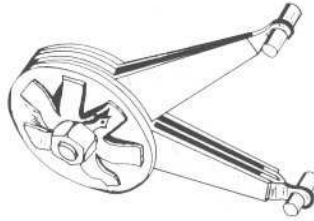


Figura 2.8. Amortiguador de fricción.

Algunos de los inconvenientes que presentan los amortiguadores de fricción frente a los amortiguadores hidráulicos son los siguientes:

- Una vez superada la fuerza de fricción que ejercen estos amortiguadores, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad, como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas de forma periódica.

2.2.2.2 AMORTIGUADOR TELESCÓPICO

El amortiguador telescópico, básicamente, consta de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existen una serie de orificios y unas válvulas precomprimidas que facilitan el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor determinado. Los orificios representan el paso permanente y las válvulas el paso de apertura por presión respectivamente. El paso permanente vienen a ser orificios fijos que restringen el flujo del caudal. En el caso de las válvulas de apertura por presión, para que estas se abran es necesario ejercer sobre ellas una determinada presión y a medida que esta aumenta la presión va siendo mayor. En estos, la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad [7].

Dentro de los amortiguadores telescópicos, se pueden encontrar los amortiguadores bitubo y monotubo, los cuales se explican a continuación.

2.2.2.2.1 AMORTIGUADOR MONOTUBO

Los amortiguadores monotubo están adquiriendo cada vez más importancia sobre todo en vehículos de altas prestaciones y en competición [7]. Este amortiguador consta de dos cámaras principales, una contiene el aceite y la otra gas a presión (generalmente nitrógeno) que están separadas por un pistón flotante (véase figura 2.9).

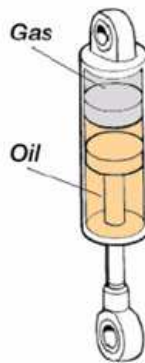


Figura 2.9. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

Algunas de las características que presentan los amortiguadores monotubo son las siguientes:

- Buena refrigeración puesto que la cámara está en contacto directo con el aire.
- Presiones de operación reducidas ya que constan de un diámetro de gran tamaño.
- Su posición de montaje no queda restringida debida a que contienen un pistón separador.
- Elevados costos derivados de requerimientos de precisión, tolerancias de fabricación, y estanqueidad del gas.
- Presentan una compleja valvulería.
- Tienen una gran necesidad de espacio.

2.2.2.2.2 AMORTIGUADOR BITUBO

Los amortiguadores bitubo son los más utilizados en la actualidad. Constan de dos cámaras, una interior y otra de reserva (véase figura 2.10). Contienen válvulas situadas en el pistón y en la base del amortiguador, siendo esta última la llamada

válvula de pie. Los amortiguadores de doble tubo se dividen a su vez en dos tipos, los no presurizados (utilizan aceite), y los presurizados (con aceite y gas).

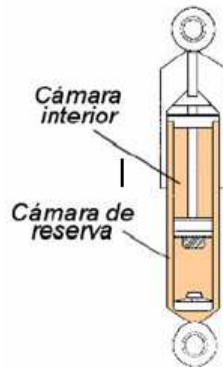


Figura 2.10. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo.

Algunas de las características de los amortiguadores bitubo en comparación con los monotubo son las siguientes:

- Los amortiguadores bitubo presentan menores costos en lo que se refiere a requerimientos de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas.
- Su valvulería es más sencilla que las de los amortiguadores monotubo.
- Tienen menor necesidad de espacio que los amortiguadores monotubo.
- Presentan peor refrigeración.

2.2.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

2.2.3.1 SILENTBLOCKS

Los elementos constructivos más importantes son los denominados casquillos o *silentblocks*, elementos de goma vulcanizada utilizados para unir las suspensiones al chasis, de forma que no existan piezas móviles metálicas en contacto. Los casquillos deben conseguir un buen aislamiento y permitir que las suspensiones trabajen correctamente. Como ventajas, los casquillos presentan un buen mantenimiento y una notable amortiguación propia, aunque como inconvenientes se muestran sensibles a la temperatura, a las inclemencias del tiempo, a los productos químicos y al aceite. En la figura 2.11 se muestra un ejemplo de *silentblock*.



Figura 2.11. Detalle de un silentblock.

2.2.3.2 RÓTULAS

Las rótulas son elementos de fijación entre la suspensión y la dirección, que permiten el giro y el pivotamiento de la misma manteniendo la geometría de las ruedas. Su fijación suele realizarse mediante tornillos. En la figura 2.12 se muestra una vista en corte de una rótula.



Figura 2.12. Vista en corte de una rótula.

2.2.3.3 BRAZOS DE SUSPENSIÓN

Los brazos de suspensión son unos brazos de acero que soportan al vehículo a través de la suspensión, uniendo la mangueta y su correspondiente buje mediante *silentblocks* y elementos de guiado, soportando así los esfuerzos generados por el vehículo durante su funcionamiento. La figura 2.13 muestra una vista en detalle de un brazo de suspensión.



Figura 2.13. Vista en detalle de un brazo de suspensión.

2.2.3.4 TIRANTES DE SUSPENSIÓN

Los tirantes de suspensión son brazos de acero, transversales o longitudinales, que se sitúan entre la mangueta y el trapecio y sirven como elemento de sujeción y de guiado. Por su colocación absorben los desplazamientos y los esfuerzos de los elementos de la suspensión a través de los *silentblocks* o cojinetes elásticos.

2.2.4 ELEMENTOS DE MEJORA

2.2.4.1 BARRAS ESTABILIZADORAS

Cuando un vehículo toma una curva, por la acción de la fuerza centrífuga se carga el peso del coche sobre las ruedas exteriores, con lo cual la carrocería tiende a inclinarse hacia ese lado con peligro de vuelco. Para evitar este fenómeno se montan sobre los ejes delantero y trasero las barras estabilizadoras, las cuales consisten en una barra de acero elástico cuyos extremos se fijan a los soportes de suspensión de las ruedas; de esta forma, al tomar una curva, como una de las ruedas tiende a bajar y la otra a subir, se crea un par de torsión en la barra que absorbe el esfuerzo, e impide, por tanto, que la carrocería se incline, manteniéndola de este modo estable como se puede observar en la figura 2.14.

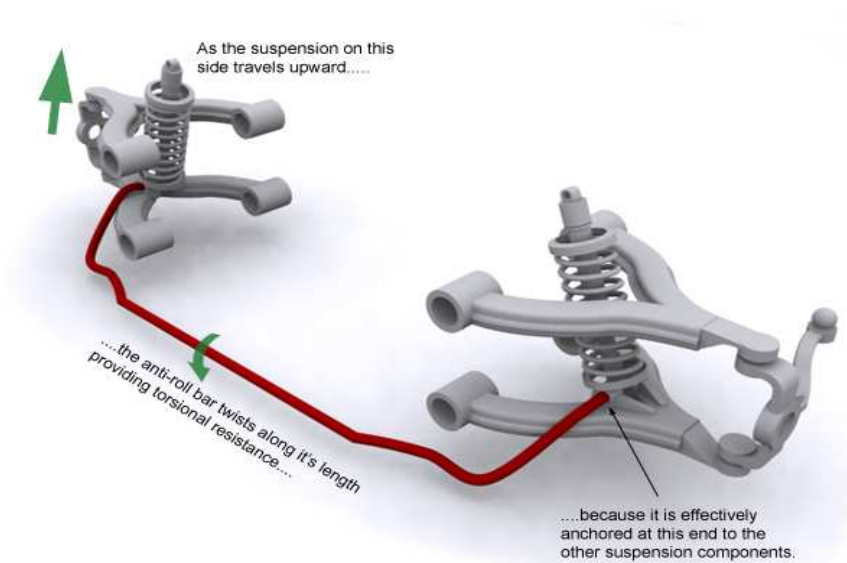


Figura 2.14. Principio de funcionamiento de una barra estabilizadora.

Las barras estabilizadoras pueden ser de dos tipos, transversales o longitudinales. A continuación, se explicará cada uno de los dos tipos [5]:

- Barras estabilizadoras transversales (véase figura 2.15). También son conocidas como barras antibalanceo, y, como su propio nombre indica, son utilizadas para evitar las posibles oscilaciones laterales (balanceos). Por ejemplo, estas barras trabajan oponiendo su resistencia a torsión frente al balanceo que un vehículo experimenta en el momento de tomar una curva.
- Barra estabilizadora longitudinal. Su misión es regular los desplazamientos originados entre la masa suspendida y no suspendida ante diferentes esfuerzos.



Figura 2.15. Barra estabilizadora transversal.

2.3 CLASIFICACIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Actualmente se pueden encontrar distintas disposiciones de suspensión, cuya elección depende directamente del tipo de comportamiento que se busca en el vehículo.

La clasificación de los sistemas de suspensión se puede llevar a cabo atendiendo a diferentes criterios, tales como la geometría, los componentes del sistema de amortiguación o el sistema de control [8].

En este proyecto, se seguirá una clasificación de los sistemas de suspensión haciendo referencia a dos tipos de clasificaciones. La primera de ellas será la clasificación según la geometría del sistema de suspensión, y la segunda tendrá en cuenta el sistema de control utilizado. A continuación se muestra un breve resumen de las dos clasificaciones que trataremos en este proyecto:

1. Clasificación en función de la geometría: Hace referencia a los elementos que componen el sistema de suspensión [3, 4, 8, 9]:
 - Suspensión rígida (eje rígido)
 - Suspensión semirrígida.
 - Suspensión independiente.
2. Clasificación en cuanto al sistema de control [1, 7, 8]:
 - Suspensión pasiva.
 - Suspensión activa.
 - Suspensión semiactiva.

En los siguientes apartados de este capítulo se procede a hacer una descripción de cada uno de los tipos de suspensión citados anteriormente.

2.3.1 CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA

2.3.1.1 SUSPENSIÓN RÍGIDA (EJE RÍGIDO)

El sistema de suspensión rígido es un sistema de suspensión también denominado sistema dependiente (véase figura 2.16). Se trata de un sistema de suspensión en el que hay un elemento no flexible que une las ruedas de un mismo eje. Este elemento rígido suele ser una barra. Como consecuencia de la rigidez de este elemento, todo el movimiento que experimenta una rueda se transmite a la otra del

mismo eje. Al estar fijado el eje al bastidor, la inclinación del eje se transmite a todo el vehículo.

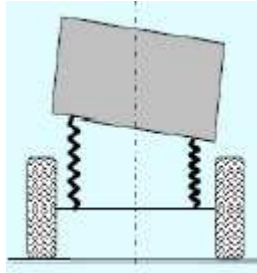


Figura 2.16. Esquema de un sistema de suspensión rígido.

Los sistemas de suspensión dependientes presentan las siguientes características:

- Son robustos, por tanto tiene gran capacidad para transportar carga.
- El ángulo de caída no se ve afectado por el balanceo de la carrocería.
- El desplazamiento en una rueda provoca giro en ambas y momentos giroscópicos que afectan a la dirección del vehículo.
- El centro de balanceo se encuentra demasiado elevado, esto hace que el desplazamiento vertical de una rueda provoque movimientos laterales.
- Presentan tendencia a ser inestables durante el frenado, el vehículo tiende a “culebrear”.
- Reducción del ángulo de avance durante el frenado (si es excesivo la dirección puede presentar inestabilidad).
- Los resortes deben hacerse más rígidos para reducir el balanceo.
- Ocupan espacio que es necesario para el motor.
- Se aplica en vehículos industriales, autobuses, todo terreno etc.

Las figura 2.17 y la figura 2.18 muestran algunos tipos de suspensiones dependientes.

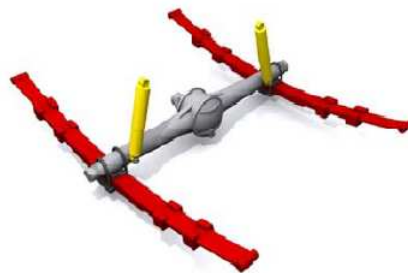


Figura 2.17. Suspensión dependiente: tipo *Hotchkiss*.

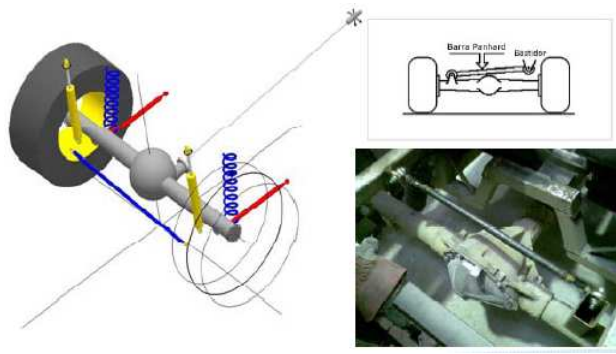


Figura 2.18. Suspensión dependiente: Barra *Panhard*.

2.3.1.2 SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA

Las suspensiones semirrígidas se diferencian de las suspensiones rígidas en que, aunque las ruedas están unidas entre sí como en el eje rígido, las oscilaciones que reciben de las irregularidades del terreno se transmiten de forma parcial. En este tipo de suspensión existe un cierto grado de dependencia en la deformación de las ruedas a cada lado. En cualquier caso, aunque la suspensión no es rígida total, tampoco es independiente.

Dentro de las suspensiones semirrígidas destacan dos tipos de suspensiones, la suspensión con “eje de Dion” y la suspensión con “eje torsional”.

En el primer tipo de suspensión semirrígida, la suspensión con “eje de Dion”, las ruedas van unidas mediante soportes articulados al grupo diferencial, y como en la suspensión con eje De Dion es parte de la masa suspendida, va anclado al bastidor del automóvil. Bajo este aspecto se transmite el giro a las ruedas a través de dos semiejes (palieres) como en las suspensiones independientes. A su vez, ambas ruedas están unidas entre sí mediante una traviesa o tubo De Dion que las ancla de forma rígida permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales limitados por unos brazos longitudinales que acompañan a la suspensión. Este sistema tiene la ventaja frente al eje rígido de que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso de la traviesa del eje De Dion. Además, la suspensión posee elementos elásticos de tipo muelle helicoidal. En la actualidad, es muy poca su utilidad debido a su coste elevado. En la figura 2.19 se muestra una suspensión semirrígida con “eje de Dion”.



Figura 2.19. Suspensión semirrígida con eje de Dion.

El “eje torsional” es otro tipo de suspensión semirrígida, utilizada en las suspensiones traseras en vehículos que tienen tracción delantera. La traviesa o tubo que une las dos ruedas tiene forma de "U", por lo que es capaz de deformarse un cierto ángulo cuando una de las ruedas encuentra un obstáculo, para después una vez pasado el obstáculo volver a la posición inicial. Las ruedas están unidas rígidamente a dos brazos longitudinales unidos por un travesaño que los une y que se tuerce durante las sacudidas no simétricas, dando estabilidad al vehículo. Esta configuración da lugar, a causa de la torsión del puente, a una recuperación parcial del ángulo de caída de alto efecto de estabilización, características que junto al bajo peso, al bajo coste y al poco espacio que ocupan, ideal para instalarla junto con otros componentes debajo del piso. Esta configuración hace que este tipo de suspensiones sea una de las más empleadas en vehículos de gama media-baja.

2.3.1.3 SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE

El sistema de suspensión independiente es un tipo de suspensión en la que no hay una unión rígida entre las ruedas de un mismo eje. Actualmente, este tipo de suspensión es el único que se utiliza para las ruedas directrices, aunque cada vez se va utilizando más la suspensión independiente a las cuatro ruedas, debido a que es la configuración que ofrece una mejor opción desde el punto de vista del confort y estabilidad al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el terreno a cada rueda sin transmitirse estas a la otra rueda del mismo eje. La figura 2.20 muestra un esquema de suspensión independiente.

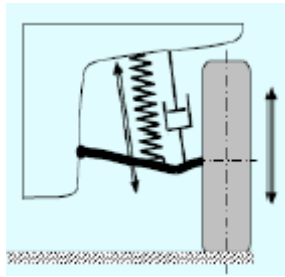


Figura 2.20. Esquema de suspensión independiente.

Los sistemas de suspensión independientes muestran las siguientes características:

- Permiten una mayor absorción de impactos y mayor estabilidad en terreno irregular, por lo que se puede mejorar notablemente la comodidad y el comportamiento sobre pavimentos en malas condiciones.
- Tienen una rigidez al balanceo, en relación a la rigidez del muelle, intrínsecamente superior a las de los sistemas de eje rígido.
- Gran flexibilidad para determinar la situación del centro de balanceo, así como la evolución del apoyo de la zona de contacto de los neumáticos a lo largo del recorrido vertical de la rueda, merced de las mayores posibilidades para elegir la geometría de los brazos de control.
- Permiten alcanzar mayores valores de recorrido de las ruedas.
- Para su utilización en el eje delantero, supone una gran reducción de los problemas de vibraciones transmitidas al sistema de dirección, merced a la desconexión de las ruedas entre sí y a la interposición de la masa del coche entre ellas.
- Permiten conseguir diseños más compactos y optimizados, con menos masa no suspendida y menor peso en general.

2.3.2 CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La clasificación según el sistema de control, actualmente, engloba tres grandes grupos: suspensión pasiva, suspensión activa y suspensión semiactiva. A continuación se detallará cada una de estas suspensiones [1, 7, 8].

2.3.2.1 SUSPENSIÓN PASIVA

Las suspensiones pasivas suponen el sistema idóneo para aumentar el confort del pasajero por lo que, tradicionalmente, es este tipo de suspensiones el que se monta en los vehículos. Esta suspensión consiste en un sistema de muelle-amortiguador que trata de absorber las irregularidades del terreno, además de aumentar la seguridad y nivel del confort de los pasajeros.

No obstante, presentan una difícil adecuación entre los parámetros de confort y de seguridad. Esto se debe a que a mayores niveles de confort, el sistema deberá aumentar su flexibilidad para poder de esta manera absorber más eficientemente las sollicitaciones del terreno, lo cual repercute negativamente en la estabilidad del vehículo ya que, cuanto más blanda sea la suspensión, mayor será el balanceo y el desplazamiento de la masa suspendida y de la masa no suspendida ya que la rueda puede despegarse del suelo.

Por tanto, se observa que aunque una suspensión pasiva pueda ser ideal para un terreno determinado, teniendo en cuenta la seguridad de los pasajeros a la vez que el confort, esta dejará de ser válida para otro terreno de características diferentes.

En la figura 2.21 se muestra un esquema de una suspensión pasiva.

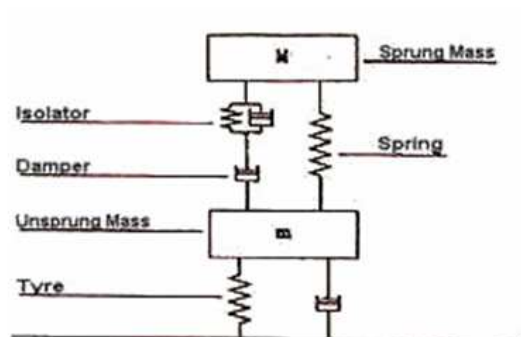


Figura 2.21. Esquema de suspensión pasiva.

2.3.2.2 SUSPENSIÓN ACTIVA

Las suspensiones activas surgen como solución a la necesidad de desarrollar vehículos que combinaran un alto nivel de confort con un alto nivel de seguridad, consiguiendo eliminar el balanceo en curva y el cabeceo en frenada manteniendo un contacto permanente de los neumáticos con el pavimento.

Para conseguir este objetivo se necesita de un sistema de control bastante complejo, componiéndose de una serie de sensores y actuadores que necesitan de un canal externo de energía.

Dentro de las suspensiones inteligentes, se pueden encontrar sistemas activos o semiactivos. En cualquier caso, ambos sistemas tienen un lazo cerrado de retroalimentación. La diferencia reside en que, en las activas no se emplean elementos propios de las suspensiones pasivas, mientras que en las semiactivas se pueden encontrar combinaciones de elementos elásticos y amortiguadores cuyo objetivo es ir modificando la respuesta del sistema de suspensión a las distintas sollicitaciones del terreno.

Para valorar la calidad de estos tipos de suspensión basta con observar el tiempo de respuesta, ya que, cuanto menor sea este, mayor será la capacidad de reacción de la suspensión. Este tiempo de respuesta vendrá determinado por el ancho de banda del sistema, por tanto, si el ancho de banda abarca un rango de frecuencias de hasta 3 ó 5 Hz, el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia, mientras que si el rango abarca frecuencias más elevadas, hasta 10 ó 12 Hz, se denomina de alta frecuencia.

La principal ventaja de la suspensión activa frente a la suspensión pasiva es la posibilidad de conseguir un control de cada rueda de forma independiente. Debido a este control independiente, se obtiene una mayor adherencia del vehículo al terreno, por lo que aumenta la seguridad en la conducción permitiendo un reposicionamiento de la carrocería casi perfecto. El inconveniente que presentan estas suspensiones es su elevado coste, principalmente en la implementación de las altas frecuencias.

En la figura 2.22 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una suspensión activa.

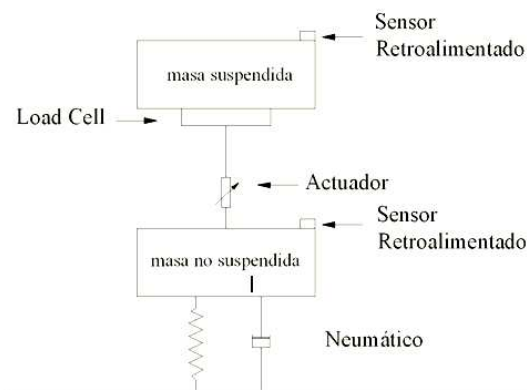


Figura 2.22. Esquema de funcionamiento de una suspensión activa.

2.3.2.3 SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Las suspensiones semiactivas son las más utilizadas en los vehículos actuales, ya que son capaces de controlar las bajas frecuencias con elementos activos y las altas frecuencias con elementos pasivos.

Este tipo de suspensión, consta de los mismos elementos que las suspensiones pasivas, amortiguador y muelle, pero, a diferencia de estas, las suspensiones semiactivas pueden modificar el comportamiento de la misma manera que ocurre en las suspensiones neumáticas. Esta modificación es debido al amortiguador, ya que dispone de válvulas que permiten regular el paso del fluido.

La posibilidad de modificar la rigidez permite ajustar la marcha, obteniéndose el mayor rendimiento y confort en la conducción, seleccionar la rigidez de la suspensión, o la capacidad de ajustar de forma automática la suspensión en función de las condiciones del pavimento.

En la figura 2.23 se muestra un esquema básico del principio de funcionamiento de un sistema de suspensión semiactivo.

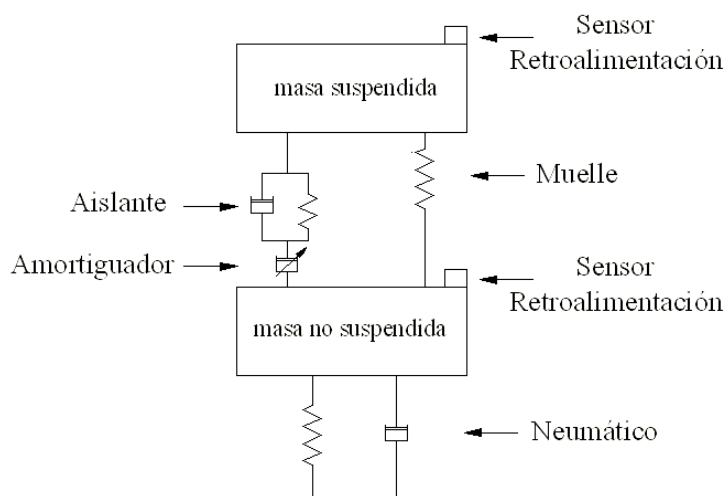


Figura 2.23. Esquema de funcionamiento de una suspensión semiactiva.

Dentro de las suspensiones semiactivas, surgió primeramente un tipo de suspensión basado en amortiguadores con electroválvulas, pero su tiempo de respuesta era demasiado alto. Este tiempo varía entre los 100 y 200 ms. Actualmente está surgiendo un nuevo tipo de suspensión basado en amortiguadores magneto-reológicos, capaces de modificar su comportamiento en un tiempo, menor que 25 ms, relativamente pequeño para variar la dureza del amortiguador.

A continuación, se explican brevemente otros sistemas de suspensión semiactiva que han desarrollado internamente diferentes marcas de vehículos:

- El sistema *Airmatic Dual Control* de Mercedes Benz (véase figura 2.24), el cual actúa sobre la rigidez del amortiguador y del muelle. Durante la conducción normal, el muelle cambia su rigidez, por lo que ofrece una suspensión blanda. En cuanto el sistema detecta oscilaciones importantes en la carrocería, el muelle prescinde de aire para endurecerse.
- El sistema *Four-C (Continuously Controlled Chassis Concept)* del Volvo S60 R (véase figura 2.25), es una amortiguación regulable electrónicamente. Posee la capacidad de variar muy rápidamente la dureza de cada uno de los amortiguadores. En la figura 2.33 se muestra un ejemplo del sistema *Four-C* integrado en un Volvo S60 R.
-

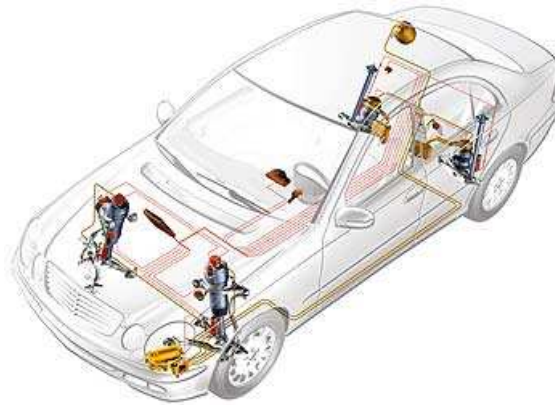


Figura 2.24. Sistema de suspensión con sistema *Airmatic* del Mercedes Clase E.



Figura 2.25. Sistema de suspensión con sistema *four-C* del Volvo S60 R.

3.1 INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA

La reología se define como la ciencia que se encarga del estudio de la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas externas, limitándose únicamente a materiales que no cumplen la ley de Viscosidad de *Newton* y la ley de *Hooke*[10, 11].

A continuación se realiza un análisis histórico para entender como se llega a esta definición.

A finales del siglo XVII Newton definió el líquido viscoso enunciando que la resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento entre las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con la que dichas partes se separan las unas de las otras. Por tanto la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor, sin recuperar ni siquiera parcialmente su forma original. Desde entonces el líquido viscoso es denominado comúnmente como fluido newtoniano.

En lo que se refiere al sólido elástico, apareció en 1678 la ley de *Hooke*. Esta ley establece que si se aplica una carga sobre un cuerpo sólido, este va a sufrir una cierta deformación elástica, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad. La ley de Hooke es de vital importancia en el estudio de la reología de sustancias sólidas.

A partir del siglo XIX los científicos comenzaron a dudar acerca de la validez universal de estas dos leyes lineales. Así la reología moderna, además de los comportamientos elásticos y viscosos, estudia también sistemas complejos que presentan propiedades viscoelásticas.

3.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas estudian el comportamiento de los fluidos sometidos a carga mecánica. La estructura sólida, al tener una forma definida, cuando se somete a carga se deforma y se tensiona. Sin embargo la estructura líquida, al carecer de una forma definida, cuando se somete a carga no se deforma sino que al cambio producido en la posición de los átomos se le llama fluencia, y tampoco se produce tensión, ya que esta se libera con la fluencia [10].

Las propiedades reológicas de los fluidos dependen de la concentración y de la densidad de las partículas, de su distribución y tamaño, de las propiedades del fluido portador, de la presencia de aditivos adicionales, de la intensidad del campo aplicado y de la temperatura de trabajo. Las relaciones que guían la interdependencia de estos factores son altamente complejas a la par que importantes, ya que de ellas depende la optimización del desarrollo de estos fluidos para aplicaciones importantes. A continuación, se explica una de las propiedades más importantes, la viscosidad.

La viscosidad es la propiedad que define el comportamiento reológico y se define como la resistencia que opone un fluido a la fluencia. Es importante destacar que la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético varía significativamente en función del aceite portador, de los agentes de suspensión y de la carga de partículas (véase figura 3.1).

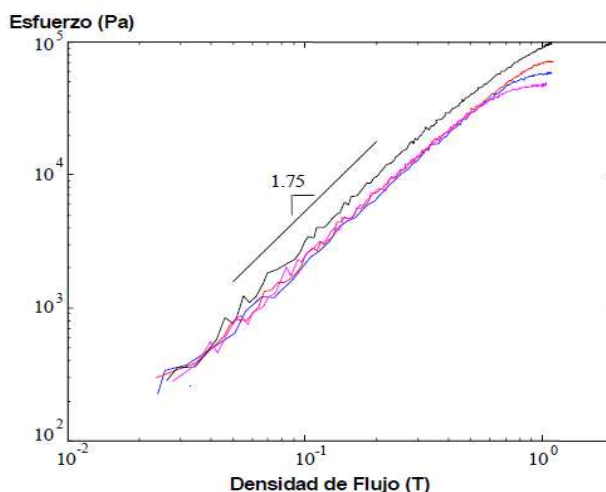


Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad del flujo.

La viscosidad de un líquido no siempre es constante y suele estar relacionada con otras variables:

- Temperatura: a elevadas temperaturas los líquidos son más fluidos mientras que a bajas temperaturas son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace más débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van Der Waals.
- Fraguado: cuando sobre un material se induce una reacción de fraguado la viscosidad del mismo aumenta con el tiempo hasta que el

material se convierte en un sólido y comienza a tener propiedades mecánicas.

- Presión: existe una relación entre la viscosidad que presenta un fluido y la compresión a la que está sometida. En función de esta relación tenemos distintos tipos de comportamiento. Estos se explican a continuación:

- Comportamiento pseudoplástico: es el que presentan los líquidos que al ser comprimidos se hacen más fluidos y al cesar dicha compresión vuelven a ser más viscosos.
- Comportamiento dilatante: en este caso al comprimir el líquido se vuelve más viscoso.
- Comportamiento newtoniano: existe una relación lineal entre el esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación cortante por lo que la viscosidad es independiente y la compresión no produce alteración sobre ella.

3.3 FLUIDOS REOLÓGICOS

Un fluido reológico se define como aquel fluido cuyas propiedades pueden variar ante un estímulo externo como un campo eléctrico o magnético. Este comportamiento se debe a que en su seno se encuentran alojadas partículas en suspensión que reaccionan ante la presencia de los citados campos. Estas partículas tienen un tamaño del orden de milímetros y normalmente son aceites de silicona o minerales [8, 12, 13].

Cuando las partículas en suspensión se encuentran sometidas a un campo externo forman cadenas en la dirección de dicho campo. Por ello, si el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del fluido, entonces las cadenas se forman perpendicularmente al flujo y debido al propio flujo estas cadenas se rompen y deben restaurarse, de modo que la constante rotura y restauración da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al movimiento denominado fluencia, el cual es necesario superar para producir el deslizamiento de las capas de fluido.

La ventaja que presentan estos fluidos frente a los fluidos newtonianos es que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior, y este esfuerzo es controlable en función de la intensidad del campo exterior aplicado. En la figura 3.2 se observa que el aumento del esfuerzo viscoso se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior.

Por ello este tipo de fluidos son especialmente aptos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y el control activo de vibraciones.

El principal inconveniente que presentan los fluidos reológicos son sus limitaciones de implantación ya que requieren elevados niveles de campo exterior para producir niveles aceptables de actuación.

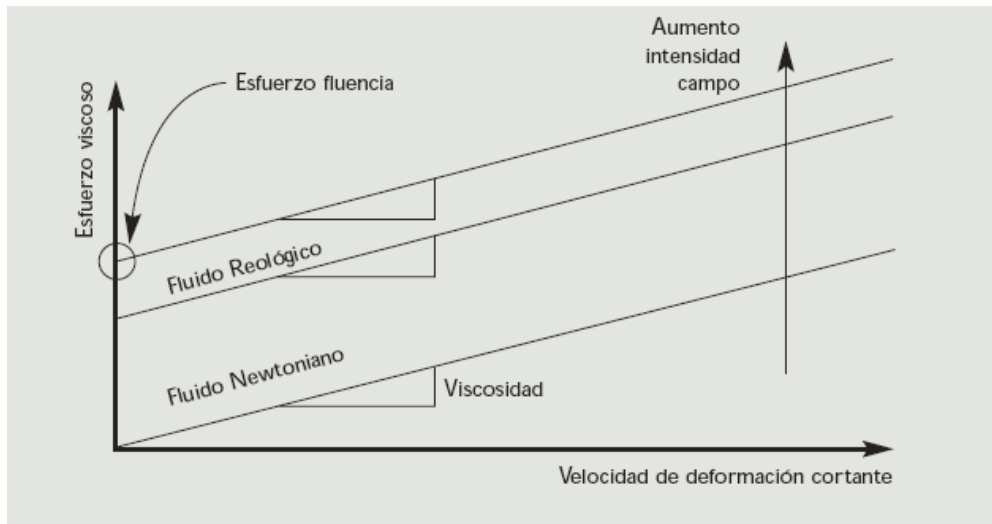


Figura 3.2. Relación entre el esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación.

Existen dos tipos de fluidos reológicos que pueden considerarse materiales activos. Ambos comparten el principio de los fluidos reológicos, y su diferencia radica en que son sensibles a campos externos distintos. Las dos clases de fluidos reológicos son los fluidos electro-reológicos y los fluidos magneto-reológicos que se explicarán en posteriores apartados de este capítulo.

3.3.1 FLUIDOS ELECTRO-REOLÓGICOS

Los fluidos electro-reológicos (FER) son aquellos que varían sus propiedades ante la presencia de un campo eléctrico cuando este es inducido por una corriente directa. Su principal aplicación es la fabricación de sistemas de amortiguación autocontrolables [14].

Un fluido electro-reológico está formado por un medio continuo (generalmente un líquido aislante) y un medio disperso que puede ser sólido o líquido. La particularidad del medio disperso es que pueda polarizar en presencia de un campo eléctrico.

Las propiedades reológicas de un FER pueden sufrir cambios reversibles de varios órdenes de magnitud bajo la acción de un campo eléctrico externo, con intensidades

que alcanzan incluso varios kilovoltios por milímetro. Las propiedades del flujo pueden ser fácilmente controladas y, por ello, los FER pueden ser usados como interfaces eléctricas y mecánicas en varias áreas de la industria, por ejemplo en la industria automotriz para embragues, frenos, y sistemas de amortiguamiento.

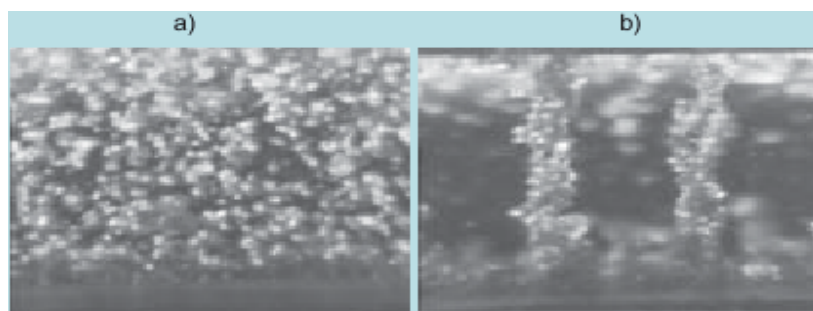


Figura 3.3. Distribución de partículas en un FER:

a) suspensión sin campo eléctrico.

b) suspensión con campo eléctrico de 1KV/mm.

En la figura 3.3.a se observa que antes de la aplicación del campo eléctrico las partículas del FER se encuentran distribuidas al azar en la suspensión. Mientras que al aplicarse una diferencia de potencial las partículas se orientan en la dirección de aplicación del campo eléctrico (véase figura 3.3.b).

3.3.2 FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Los fluidos magneto-reológicos (MR) son aquellos que cambian sus propiedades ante la presencia de un campo magnético. Se trata de suspensiones acuosas de microesferas super-paramagnéticas que contienen gránulos de magnetita dispersos en una matriz polimérica. Las partículas no poseen remanencia ni histéresis magnética y se suele añadir un surfactante para estabilizar las suspensiones. Bajo la acción de un campo magnético constante las partículas adquieren un momento dipolar que genera una interacción dipolar entre estas, la cual produce la agregación de las partículas en forma de collares alineados con el campo magnético [15, 16].

Las partículas que componen los fluidos magneto-reológicos tienen unas dimensiones muy pequeñas. Estas estructuras restringen la movilidad del fluido, aumentando así la viscosidad y, por tanto, la resistencia en aplicaciones de suspensiones. Cuanto mayor es el campo magnético, mayor será la energía necesaria para romper dichas microestructuras. En la figura 3.4 se puede apreciar la influencia del campo magnético sobre el campo de velocidades un fluido magneto-reológico.

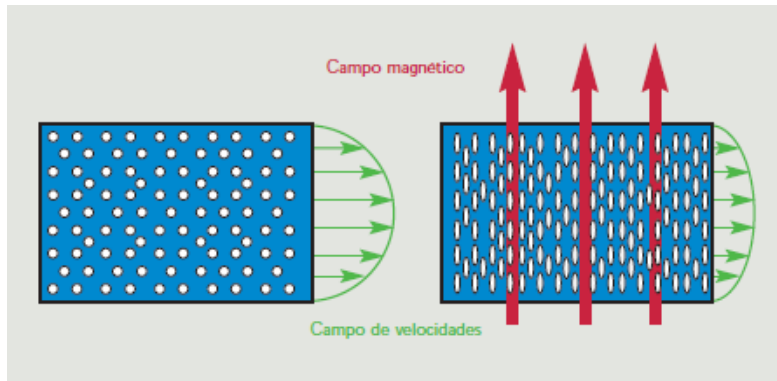


Figura 3.4. Campo de velocidad en un fluido magnético.

Actualmente, se pueden encontrar dos tipos de fluidos magneto-reológicos. El primero de ellos son los formados por partículas dispersas. Estos reaccionan debido a la agregación de partículas en suspensión provocada por la polarización de los materiales. Por otro lado se encuentran los fluidos homogéneos, que permiten mayores miniaturizaciones ya que carecen de partículas, pudiendo llegar a ser muy útiles en aplicaciones de microtecnologías.

3.4 APLICACIONES DE LA REOLOGÍA EN EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

3.4.1. AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

Los amortiguadores magneto-reológicos representan un caso particular de suspensión semiactiva y un avance relativamente reciente. Los primeros prototipos datan de principios de los 90, aunque General Motors presentó este sistema en el Salón de Francfort de 1999, y ahora emplea la segunda generación en modelos como el Cadillac *Seville* y el Chevrolet *Corvette* [7].

Se trata de amortiguadores monotubo semiactivos que en vez de aceite corriente llevan un fluido magneto-reológico, prescindiendo de válvulas electromecánicas. Este fluido está compuesto de un 40% aproximadamente de partículas metálicas flotando en él. Al magnetizarse, según si lo hace mucho o poco, modifica su viscosidad, consiguiéndose variar la dureza del amortiguador. La principal ventaja de este sistema frente a los convencionales es la rapidez de variación del tipo de amortiguación, y las

grandes posibilidades de regulación que permite. En la figura 3.5 se muestra el Cadillac Seville equipado con el sistema *MagneRide* de Delphi.



Figura 3.5. Cadillac seville STS equipado con el sistema *MagneRide* de Delphi.

El sistema *MagneRide Automotive* es la primera aplicación industrial de un fluido cuya viscosidad varía ante la presencia de un campo magnético.

El fluido que usa este sistema es una suspensión no coloidal, con partículas de hierro con un tamaño de algunas micras en un hidrocarburo sintético. Sin la presencia de un campo magnético, las partículas de hierro están dispersas al azar en el seno del fluido. A medida que aumenta el campo magnético, el fluido se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica.

Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que fluyen rodeadas de otras partículas de fluido (véase figura 3.6). Gracias a esta diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante. El flujo es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta.

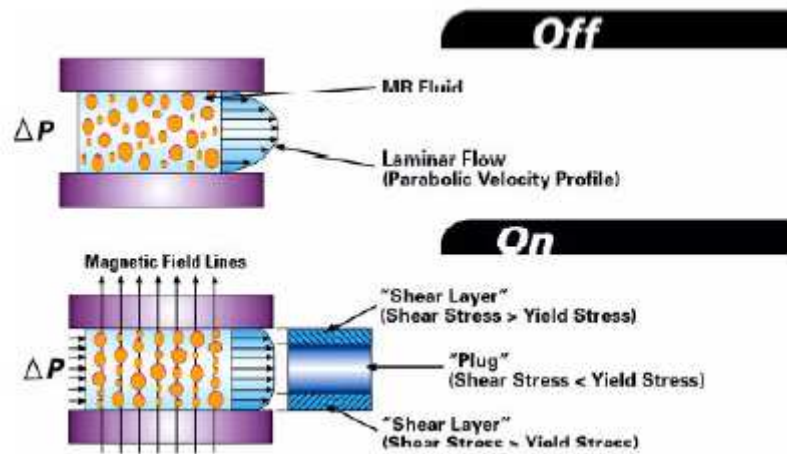


Figura 3.6. Magnetización del fluido del *MagneRide*.

La intensidad de campo magnético la ajusta una centralita, que recibe señales de cinco sensores (véase figura 3.7). Tres de ellos están ya en el control de estabilidad (ángulo de dirección, guiñada y aceleración transversal), otro es la velocidad del vehículo y otro la posición relativa de las ruedas. *Delphi* ha previsto que esta centralita pueda controlar un sistema de altura constante.

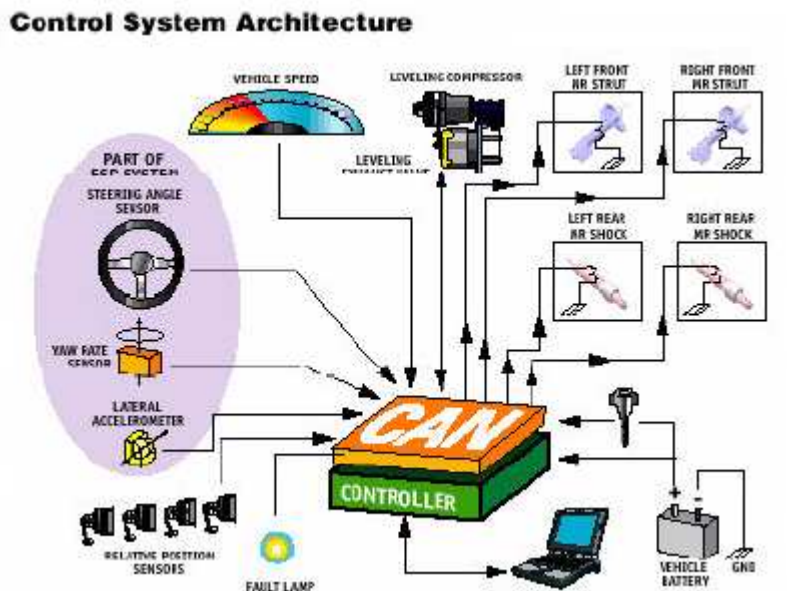


Figura 3.7. Esquema del sistema completo *MagneRide*.

Esta amortiguación variable sigue el mismo principio de funcionamiento que una de electroválvulas: suave cuando es posible y dura cuando es necesario. El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, bien por razones de estabilidad o bien por frenada.

También actúa para frenar movimientos como el balanceo o el cabeceo, aunque la amplitud de esos movimientos, dependen de los muelles y las estabilizadoras, no de los amortiguadores.

SOFTWARE LABVIEW 2009

4.1 INTRODUCCIÓN

Labview se ha convertido en un estándar en el desarrollo de aplicaciones de test y medida, control de instrumentación y sistemas de adquisición de datos. Su flexibilidad y potencia, le ha hecho expandirse a otras áreas tales como visión artificial, control de movimiento, análisis de ruido y vibraciones etc. *Labview* está creciendo en nuevas áreas estratégicas relacionada con nuevos campos de trabajo como la simulación, diseño de control, sistemas embebidos en tiempo real, algoritmos matemáticos avanzados etc.

Labview es un lenguaje y a la vez un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de forma rápida y sencilla. En relación a su entorno *Labview* posee dos ventanas principales. Estas son el panel frontal, es la parte que verá el usuario la cual suele tener fondo gris, y el diagrama de bloques, donde se realizará la programación la cual suele tener fondo blanco. Ambos están conectados a través de los terminales (elementos que sirven como entradas o salidas de datos). Las figuras 4.1 y 4.2 las dos ventanas mencionadas anteriormente.

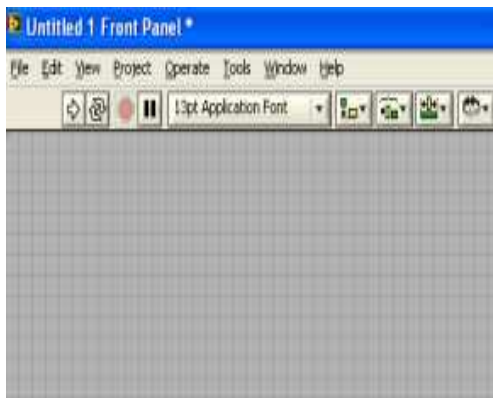


Figura 4.1. Panel frontal Labview



Figura 4.2. Diagrama de bloques Labview

En el diagrama de bloques se encuentra una barra de herramientas que permite ejecutar el programa y detectar si hay algún error, ejecutarlo de forma continua, abortar la ejecución de dicho programa, y realizar una pausa en el programa.

En la realización del presente proyecto resultan de gran utilidad los indicadores para gráficas, especialmente el indicador *Waveform Graph*. Este indicador permite dibujar totalmente la gráfica cuando le llegan los datos. La figura 4.3 muestra el aspecto de este indicador gráfico [17].

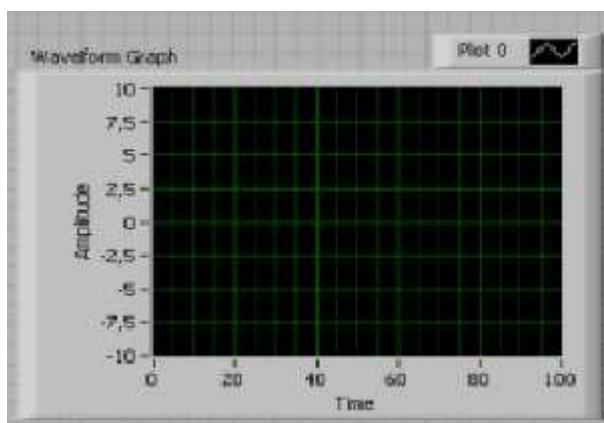


Figura 4.3. Waveform Graph.

Con esta presentación el lector queda introducido en el entorno Labview para comprender la metodología llevada a cabo para la implementación del programa desarrollado en la obtención de los resultados en los ensayos realizados.

4.2 IMPLEMENTACIÓN CÓDIGO LABIEW 2009

En este apartado se realiza una introducción del sistema de programación utilizado tanto para la adquisición de señal como para la generación de señal.

4.2.1 ADQUISICIÓN DE SEÑAL

Todo el proceso que se explica a continuación permite la adquisición de señales analógicas, lo cual constituye una de las partes para poder realizar la toma de datos sobre el amortiguador magneto-reológico.

Con el fin de facilitar la programación mediante *Labview* se dispone del asistente DAQ, el cual puede encontrarse en la paleta de funciones del diagrama de bloques (véase figura 4.4).



Figura 4.4. Asistente DAQ

Una vez inicializado, este asistente permite seleccionar el tipo de señal, analógica o digital, la tarjeta que se usará así como el canal al que se desea conectar (véase figura 4.5 y figura 4.6).

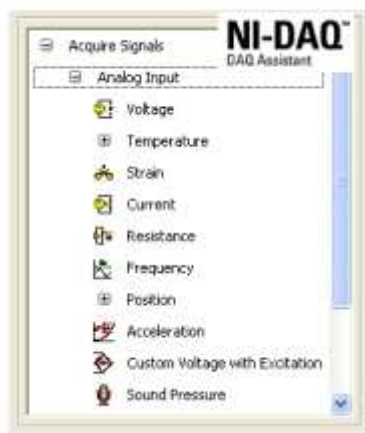


Figura 4.5. Selección tipo de señal.



Figura 4.6. Selección de tarjeta y canal.

Posteriormente, se selecciona el número de medias a realizar, la frecuencia de dicha toma de medidas y se procede a realizar la conversión de tensión a desplazamiento ya que por defecto *Labview* proporciona la tensión en función del tiempo y lo que se requiere en la ejecución de este proyecto es el desplazamiento en función del tiempo. La figura 4.7 muestra el cuadro donde se realizan estos ajustes y la

figura 4.8 muestra la recta de calibración que nos permite hacer la conversión de tensión a desplazamiento.

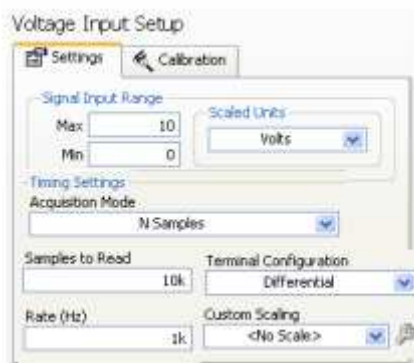


Figura 4.7. Cuadro de ajustes DAQ.

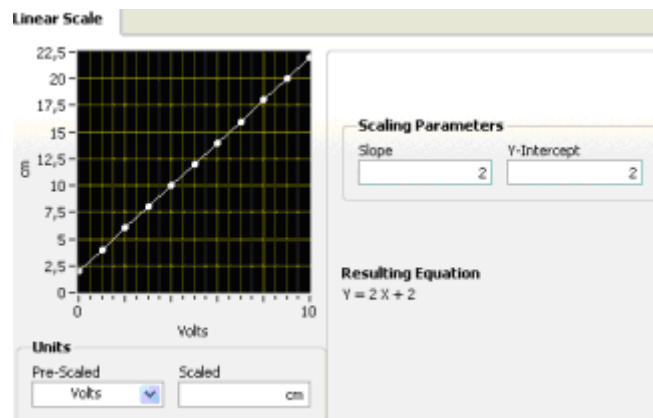


Figura 4.8. Recta de conversión V-cm

De esta manera queda perfectamente definido el *Daq Assistant* que permitirá acoplar diferentes indicadores, tanto numéricos como gráficos, que facilitarán la visualización de la curva trazada en la realización de los ensayos así como los datos tabulados que se podrán convertir fácilmente a formato *Excell* (véase figura 4.9.)

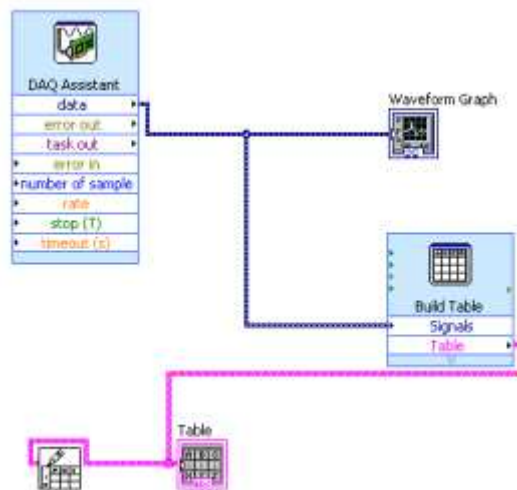


Figura 4.9. Definición gráfica adquisición de datos.

4.2.2 GENERACIÓN DE SEÑAL

Para la correcta realización de la toma de datos sobre al amortiguador, se requiere la generación de señal en forma de voltaje, lo cual se consigue mediante la programación que se muestra en la figura 4.10.

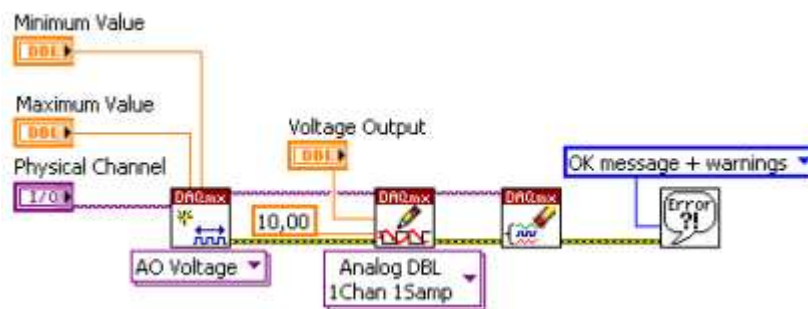


Figura 4.10. Definición gráfica generación de señal.

A continuación, en el diagrama de bloques se procede a seleccionar el canal de salida así como la tensión de alimentación (véase figura 4.11).

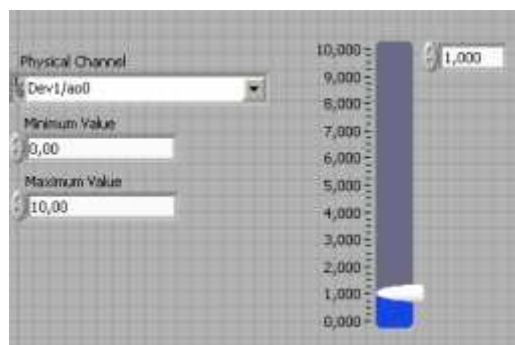


Figura 4.11. Selección canal de generación de señal.

Con todo ello se puede comenzar la realización de ensayos realizando todas las conexiones oportunas para cada señal de salida y de entrada. Estas conexiones se presentan en el siguiente capítulo una vez definidos todos los componentes físicos que intervienen en la realización del presente proyecto.

HARDWARE EMPLEADO

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se introduce y se describe los diferentes elementos utilizados para la obtención de datos, así como la ubicación de los mismos en el vehículo utilizado para realizar este proyecto.

Los elementos que permiten realizar el estudio del amortiguador magneto-reológico son los sensores de desplazamiento, el dispositivo controlador, el equipo controlador y el software *Labview* descrito en el capítulo anterior.

Este capítulo también muestra la descripción de las conexiones realizadas entre el hardware y el software mediante cables para la correcta toma de medidas cuyos resultados se muestran en el siguiente capítulo.

5.2 EQUIPO UTILIZADO

El equipo controlador utilizado en el presente proyecto fue adquirido a National Instruments y consta de un chasis capaz de adaptar varios módulos desmontables para la captación de la señal y la alimentación de diversos equipos [18]. El chasis utilizado es el NI PXI 1031DC (ver figura 5.1), que dispone de cuatro ranuras y de dos opciones de entradas, una de 100 a 120 V o 200 a 240 V en corriente alterna (AC) y otra de 11 a 30 V en corriente continua (DC), con un máximo de 30 A de amplitud. El NI PXI 1031DC fue elegido para este proyecto debido a que es una solución ideal para uso portátil, a distancia, o a bordo de vehículos. Las características técnicas del chasis NI PXI 1031DC se muestran en el Anexo A.



Figura 5.1. Chasis NI PXI 1031DC

El primer módulo utilizado es el NI PXI 6230 (ver figura 5.2), el cual será el responsable de alimentar a los sensores, además de dar el voltaje necesario al amortiguador magneto-reológico para que este pueda cambiar sus propiedades en el momento del experimento. El NI PXI 6230 contiene, además de 6 entradas digitales y 4 canales de salida digital, 4 salidas analógicas con una resolución de 16 bits hasta 500 kS/s. Gracias a estas salidas analógicas, este módulo será capaz de realizar las tareas de alimentación a diversos dispositivos como se ha comentado anteriormente. Las especificaciones de este módulo, como con los otros dos PXI's, se detallarán en el Anexo A.



Figura 5.2. Módulo NI PXI-6230

El segundo de los módulos utilizados es el NI PXI 4472B, el cual se muestra en la figura 5.3, y dispone de ocho entradas analógicas muestreadas simultáneamente y optimizadas ante vibración hasta 102.4 kS/s. Esta tarjeta presenta la habilidad de sincronizar hasta 5000 canales en un sistema PXI. Dispone además de un acoplamiento de AC/DC configurable por software con una resolución de 24 bits. Dicho módulo será el responsable de captar las señales procedentes de los sensores en el momento de la medición, para así guardarlas y analizarlas posteriormente. Las características técnicas o especificaciones se adjuntarán en el Anexo A.



Figura 5.3. Módulo NI PXI 4472B

5.2.1 UBICACIÓN DEL EQUIPO EMPLEADO

En este apartado se explicará la ubicación exacta de los diferentes equipos utilizados en los ensayos tales como el equipo controlador PXI, y la pantalla destinada a controlar los datos adquiridos.

El equipo controlador PXI se ha colocado en el asiento del copiloto, ya que era un espacio libre dentro del vehículo, además de ser la mejor situación para poder realizar todas las conexiones perfectamente, ya que los cables de conexión de los que disponían los sensores eran demasiado cortos. En la figura 5.4., se muestra la colocación del controlador PXI en el asiento del copiloto en el momento del ensayo.

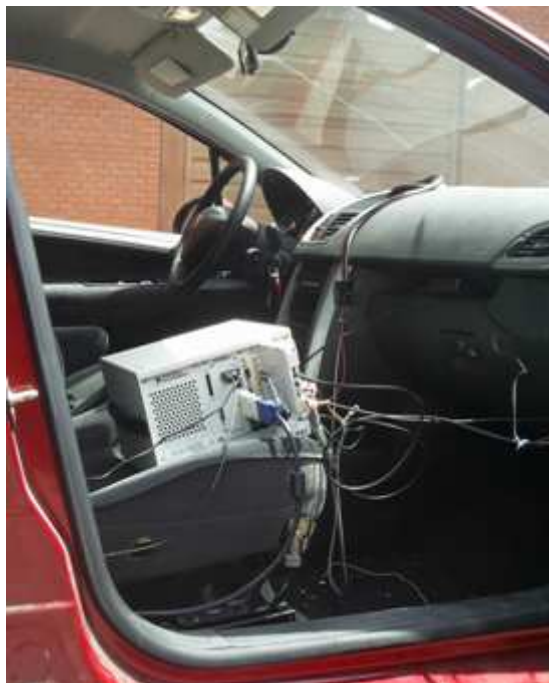


Figura 5.4. Ubicación equipo controlador PXI.

Por último, la pantalla destinada a controlar los datos adquiridos, junto con el teclado y ratón pertinentes, han sido ubicados en los asientos traseros del vehículo, ya que es la mejor posición para que la toma de datos de los ensayos sean controladas correctamente por una persona que esté sentada en los asientos traseros. Además, debido a su gran longitud, los diferentes cables de alimentación y conexión con el controlador PXI permitían fácilmente esta ubicación. En la figura 5.5 se muestra la situación de los asientos traseros del vehículo en el momento de los ensayos.



Figura 5.5. Ubicación pantalla, teclado y ratón.

5.3 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

5.3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES

Los sensores extensiométricos instalados en la suspensión delantera del vehículo, son utilizados para la medición del desplazamiento que experimenta cada amortiguador, tanto el convencional como el magneto-reológico. Dichos sensores corresponden al tipo MTN / E de la serie de transductores industriales de desplazamiento LVDT, los cuales presentan rangos de medición que pueden variar desde $\pm 0,5$ hasta ± 500 mm. Estos sensores están contruidos en acero inoxidable, lo cual les data de extraordinarias características específicas para las condiciones de trabajo más exigentes, incluso en ambientes húmedos o polvorientos.

El transformador variable lineal (LVDT) está constituido por tres arrollamientos coaxiales sobre un cilindro aislante. En ellos, el arrollamiento central actúa como primario, mientras que los otros dos actúan como secundarios. El funcionamiento de este transformador se basa en la variación de la inductancia mutua entre el primario y cada uno de los secundarios al desplazarse a lo largo de su interior un núcleo de material ferromagnético, arrastrado por un vástago no ferromagnético, unido a la pieza cuyo movimiento se desea medir. La figura 5.6 muestra el tipo de sensor utilizado para medir el desplazamiento de cada amortiguador [19].



Figura 5.6. Sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.

La gama de sensores de DC ofrecen señales de salida que varían de 0 a 10 V con un margen de error de $\pm 2,5$ V, así como un cable de salida a 20 mA.

Entre sus características mecánicas destacan la inclusión de núcleo de guiado para la varilla de extensión, la cual incorpora a su vez una rótula para garantizar los grados de libertad posibles. A su vez dispone de otra rótula en el extremo opuesto. En la figura 5.7 se puede observar el plano que describe el sensor.

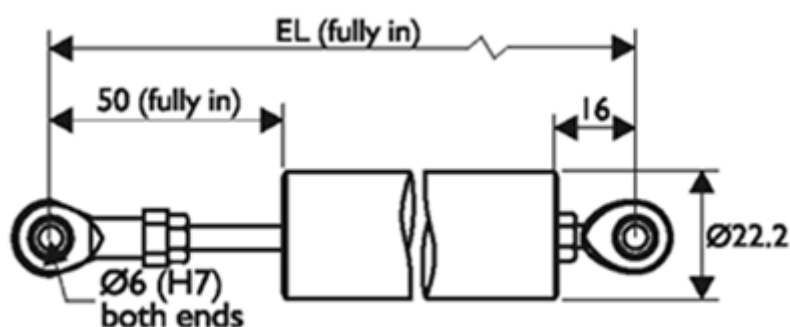


Figura 5.7. Plano sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.

5.3.2 UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

El proceso de colocación de ambos sensores de desplazamiento es análogo, tanto en la suspensión derecha como en la izquierda, quedando dispuestos en las posiciones que se muestran en las figuras 5.8 y 5.9, respectivamente, debido a que las grandes dimensiones que los caracterizan no permiten instalarlos de otra manera. En primer lugar, se procede a quitar la rueda, así como el panelado circundante a la misma en todos los bajos del coche, para disponer de mejor visibilidad. Seguidamente, es necesario realizar dos taladros del mismo diámetro, uno de ellos en la parte frontal del trapecio y otro en la chapa situada en la parte inferior de la copela.



Figura 5.8.Sensor de la suspensión derecha



Figura 5.9. Sensor de la suspensión izquierda

5.4 KIT CONTROLLER

5.4.1 DESCRIPCIÓN DEL KIT CONTROLLER

EL dispositivo controlador utilizado es el *Lord Wonder Box device controller kit*. Se trata de un producto que sirve de soporte para los dispositivos de fluido magneto-reológico (MR). El *kit controller* tiene una capacidad para suministrar 12 voltios en corriente continua y 2 salidas a través de los cuales se puede alimentar.

Este dispositivo controlador proporciona un circuito cerrado que controla la corriente para compensar el cambio de cargas eléctricas hasta los límites de la capacidad que puede suministrar. También puede utilizarse como un interfaz para PLC y el control de dispositivos para MR. Únicamente puede utilizarse en lugares cubiertos, de interior.

En el caso de necesitar realizar un control manual, se proporciona un potenciómetro para controlar la corriente solicitada por un dispositivo ajeno al sistema.

La figura 5.10 muestra el dispositivo controlador que se utiliza, indicando las partes del mismo, las cuales se explican posteriormente.



Figura 5.10. *Lord Wonder Box device controller kit*.

Para realizar operaciones con el dispositivo controlador es necesario conectar cada cable del dispositivo al amortiguador MR. Para ello se introduce el conector dentro del controlador de salida (B). En este proceso la polaridad no es relevante. A continuación se conecta el suministrador de potencia al conector de señal de entrada (A). Una vez finalizado este procedimiento el *led* rojo debe permanecer luciendo, lo que indica que el dispositivo controlador está en condiciones para ser utilizado y desempeñar las funciones que se requieran.

En el caso de necesitar un control manual, la corriente que alimenta al dispositivo se debe regular rotando el potenciómetro (C) en el sentido de las agujas del reloj. En esta situación no debe conectarse ningún tipo de control de tensión a la salida del BNC (D).

Para realizar el control del voltaje externo procedente de otra fuente, se debe mantener el regulador de potencia a cero, es decir, completamente girado en el sentido de las agujas del reloj. En este momento se puede conectar una señal de tensión con un valor de 0 a 5 Voltios al terminal BNC del *kit controller*, la cual permite controlar la salida de corriente. El control de la señal de entrada puede ajustarse mediante una frecuencia equivalente a 1 KHz. La corriente de salida es proporcional a la señal de entrada de tensión. Esta corriente de salida será igual a cero Amperios cuando el control de la tensión de entrada que se conecta al BNC tenga un valor comprendido entre 0.4 y 0.8 Voltios. Esta última afirmación será objeto de ser comprobado, lo cual se verá en el capítulo 6 de este proyecto.

Tanto para el control manual como para el control mediante el suministro de tensión externa, la corriente que llega al dispositivo se pueda resetear mediante el botón E disponible en el *kit controller*.

5.4.2 UBICACIÓN DEL KIT CONTROLLER

En lo que se refiere al regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico, se ha colocado en el lateral derecho de la luna delantera del vehículo, fijándolo correctamente con adhesivo. Dicha colocación es debida a que los cables que unen el amortiguador con su correspondiente regulador eran demasiados cortos, por lo que resulta muy complicado situarlo dentro del vehículo. En la figura 5.11 se muestra la ubicación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico en el vehículo.



Figura 5.11. Ubicación dispositivo controlador.

5.5 CONEXIONADO ENTRE EQUIPOS

La alimentación de los equipos empleados es diferente para cada uno de ellos. El equipo controlador PXI's está alimentado por la batería del propio vehículo, ya que requiere una alimentación de entre 11 y 30V y la batería proporciona un voltaje de 12V. El teclado y el ratón están conectados al chasis de *National Instruments* vía USB. Por otro lado, los sensores de desplazamiento van a ir alimentados por el módulo NI PXI 6230, gracias a las 4 salidas de las que dispone, ocupando cada sensor una salida. La tercera salida del NI PXI 6230 será utilizada para proporcionar el voltaje del amortiguador. La cuarta salida se quedará vacía. En la figura 5.12 se muestra el *pinout* o esquema de las conexiones realizadas en el módulo NI PXI 6230.

Por último, la regulación del voltaje de entrada del amortiguador magneto-reológico se lleva a cabo a través de su *Kit Controller*, el cual está alimentado a través del módulo NI PXI 6230 y éste a su vez le transmite la alimentación al amortiguador. La pantalla ha sido conectada a la batería del coche, utilizando un transformador de señal de entre 12 y 220V.

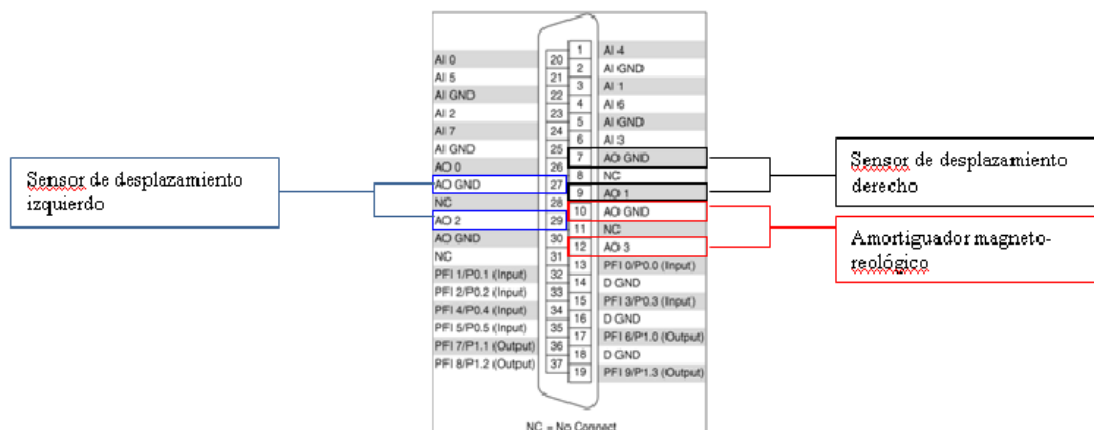


Figura 5.12. Conexiones en el módulo PXI 6230.

El conexionado llevado a cabo entre el amortiguador, los dos sensores de desplazamiento y los módulos PXI 6230 y PXI 4472B, sigue el esquema mostrado en la figura 5.13.

Debido a que los sensores de desplazamiento únicamente cuentan con un cable a 0 voltios, ha sido necesario realizar un puentado con clemas para poder llevar la misma tierra a la señal y a la alimentación.

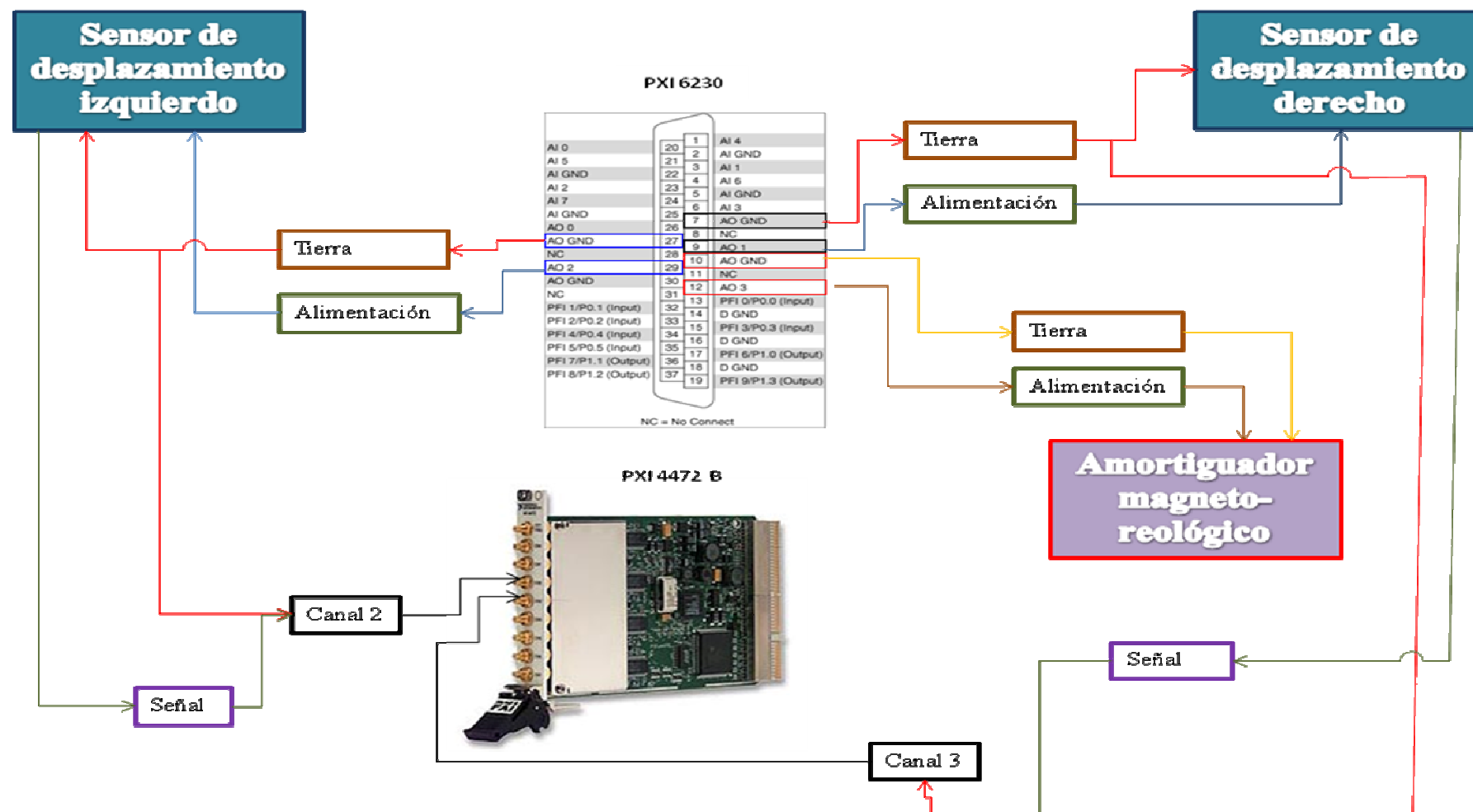


Figura 5.13. Conexionado entre equipos.

6.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE DESPLAZAMIENTO

Antes de proceder a la instalación de los sensores de desplazamiento en el vehículo, es necesario realizar un estudio completo sobre la linealidad de respuesta que presentan dichos sensores. Para ello, se han realizado medidas de su variación de voltaje entre 0 y 10 V. Estas medidas se realizan a intervalos de 2 mm tanto en carrera de extensión como de compresión, obteniéndose un total de 10 medidas en cada intervalo.

El comportamiento de ambos sensores responde a la ecuación de una recta donde las ordenadas son el voltaje (V) y las abscisas corresponden al desplazamiento del sensor (cm). También ha sido necesario estimar los errores que afectan a la pendiente (Δm) y la ordenada en el origen (Δb). Estos errores se calcularán, primeramente, comparando el error accidental con el error de precisión y tomando el mayor de estos para calcular la desviación estándar (σ) en la toma de datos del voltaje. Por tanto, mediante las siguientes fórmulas se puede calcular los errores debido a la pendiente y a la ordenada en el origen:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{n \cdot \sigma^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (1)$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sigma^2 \cdot \sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (2)$$

CAPÍTULO 6. ENSAYOS

La tabla 6.1 muestra los datos relativos al sensor de desplazamiento situado en la suspensión delantera derecha. La figura 6.1 representa la linealidad del sensor, la ecuación de la recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 6.1. Relación voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho.

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,2	8	7	6	4,8	3,9	2,6	1,5
2ª Medida	10	9,1	8,1	7	5,9	4,8	3,8	2,8	1,6
3ª Medida	10	9,2	8	7	5,9	4,9	3,9	2,7	1,5
4ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,9	4,8	3,7	2,8	1,6
5ª Medida	10	9,2	8,1	6,9	5,6	4,8	3,7	2,7	1,6
6ª Medida	10	9,1	8	7	5,9	4,8	3,7	2,7	1,5
7ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,8	4,8	3,8	2,7	1,7
8ª Medida	10	9,1	8	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,6
9ª Medida	10	9,1	8	6,9	5,8	4,8	3,7	2,8	1,7
10ª Medida	10	9,2	8,1	7	5,9	4,8	3,9	2,7	1,6
Valor Medio	10	9,14	8,05	6,95	5,86	4,81	3,78	2,72	1,59

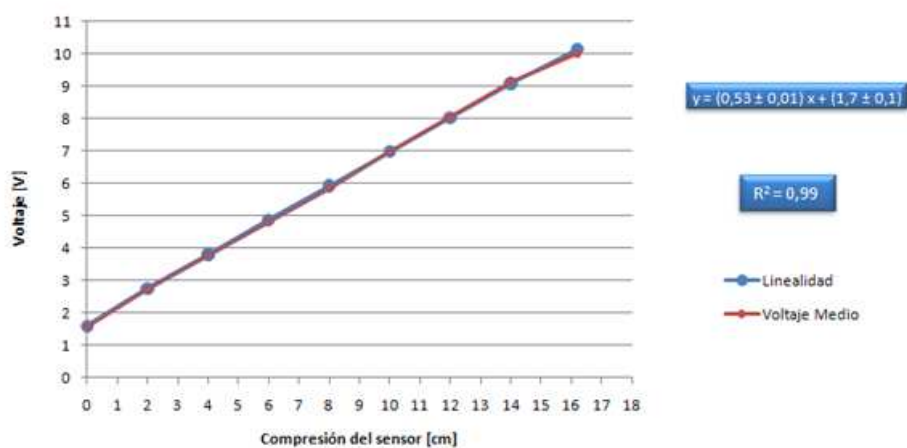


Figura 6.1. Linealidad sensor delantero derecho.

De la misma manera, la tabla 6.2 contiene los datos relativos al sensor de desplazamiento colocados en la rueda delantera izquierda. En la figura 6.2 se muestra la linealidad, ecuación y coeficiente de correlación de este sensor.

Tabla 6.2. Relación voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero izquierdo.

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
2ª Medida	10	9,3	8,3	7,1	6,1	5	3,9	3	1,6
3ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,2	5,1	4	3	1,6
4ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	3,9	3	1,6
5ª Medida	10	9,3	8,2	7,3	6,1	5	3,9	2,9	1,5
6ª Medida	10	9,3	8,1	7,3	6,1	5	4	2,9	1,5
7ª Medida	10	9,3	8,3	7,2	6,1	5,2	4,1	3	1,6
8ª Medida	10	9,4	8,3	7,1	6,1	5	4	2,9	1,6
9ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
10ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,1	5,2	3,9	3	1,6
Valor Medio	10	9,29	8,2	7,2	6,11	5,05	3,97	2,95	1,58

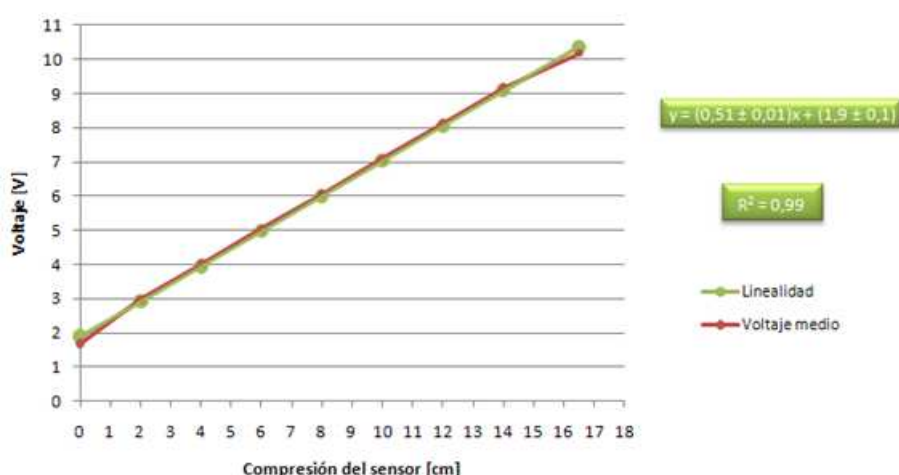


Figura 6.2. Linealidad sensor delantero izquierdo.

6.2 CALIBRACIÓN DEL KIT CONTROLLER

La calibración del *kit controller* se realiza para comprobar que la curva proporcionada por el fabricante es adecuada para ser usada, evaluando los valores de voltaje que el fabricante considera críticos a través de sus propios estudios.

Para realizar la calibración del dispositivo controlador se construye un circuito basado en una resistencia y una fuente de alimentación que permite medir la caída de tensión en el mismo. Una vez conocido este valor, se aplica la Ley de Ohm, ya que es

conocida la resistencia del *kit controller*. Por tanto, se tiene como única incógnita la intensidad para los diferentes valores de voltaje.

Se toman tres medidas para cada tensión de alimentación con el objeto de obtener valores más fiables y así poder utilizar la recta de calibración proporcionada por el fabricante (véase Anexo A.4).

En la tabla 6.3 se muestra la media de los resultados obtenidos en las tres tomas de datos realizadas para las diferentes tensiones de alimentación. A su vez, en la figura 6.3 se muestra la gráfica y la ecuación correspondiente a estos datos.

Tabla 6.3. Relación voltaje/intensidad.

Voltaje [V]	Intensidad [mA]
0	0
0,25	0
0,5	0
0,75	248,33333
1	524,16667
1,25	821,66667
1,5	1132,5
1,75	1431,6667
2	1730,8333

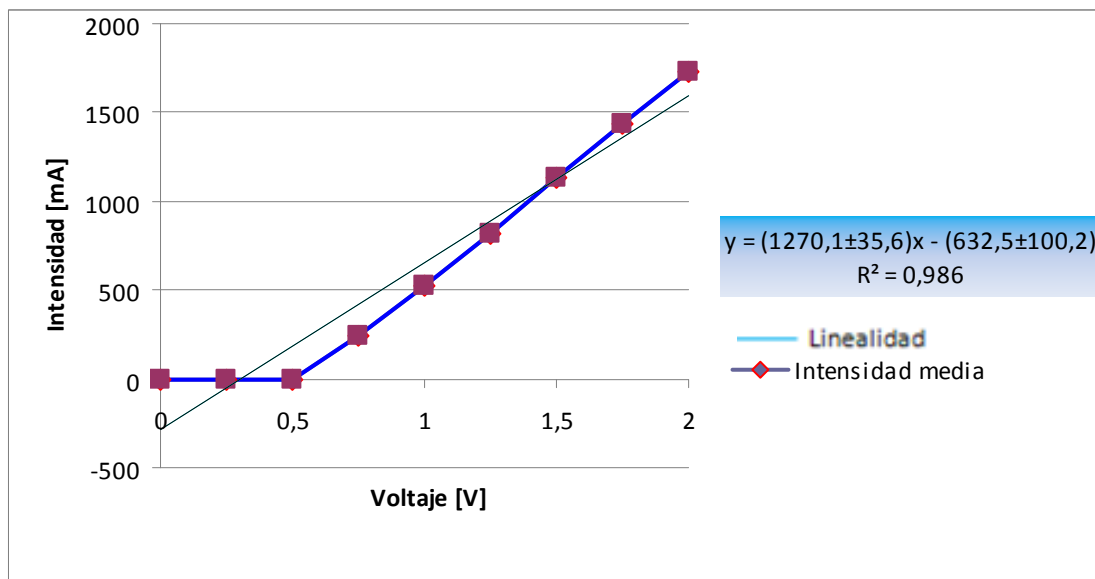


Figura 6.3. Linealidad de la toma de datos.

Se puede concluir que para un buen funcionamiento del dispositivo controlador se alimentará con un voltaje que no supere los 2 V, puesto que los datos teóricos y experimentales hasta ese valor se ajustan a la recta. Sin embargo, a partir de esa tensión de alimentación, se obtienen valores atípicos en cada una de las tres tomas de datos.

6.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Para realizar el estudio del amortiguador magneto-reológico es necesario realizar diferentes ensayos, que dependen de varios factores tales como la velocidad del vehículo, el pavimento y el valor de la tensión que alimenta el amortiguador. A continuación, se explican cada uno de los ensayos realizados.

6.3.1 ENSAYO SOBRE TERRENO ADOQUINADO

Los ensayos realizados sobre terreno adoquinado consisten en recorrer una distancia aproximada de 100 m, a una velocidad determinada y con una tensión aplicada sobre el amortiguador. La figura 6.4 muestra una perspectiva del terreno adoquinado y permite tener una referencia de la distancia en la que se ha realizado este ensayo.



Figura 6.4. Ensayo sobre terreno adoquinado.

Para realizar este ensayo, las velocidades a las que circula el vehículo son, 20, 30 y 40 km/h. Para cada valor de velocidad, se varía la tensión con la que se alimenta al amortiguador cinco veces, tomando los valores de 0, 1, 2.5 y 5 V.

6.3.2 ENSAYO SOBRE BADÉN

Los ensayos realizados sobre badén, los cuales son los más agresivos para el amortiguador, consisten en superar el obstáculo que se muestra en la figura 6.5. En este ensayo el vehículo circula a una velocidad que varía entre los 15 y 20 km/h. Después de realizar el ensayo sobre adoquinado, como se verificó al calibrar el dispositivo controlador, se comprueba que no es necesario alimentar el amortiguador con una tensión superior a los 5 V. Por tanto, las tensiones con las que se alimenta el amortiguador en este ensayo son 0, 1, 2.5 y 5 V.



Figura 6.5. Ensayo sobre badén.

6.3.3 ENSAYO SOBRE ESCALÓN

Los ensayos realizados sobre escalón suponen la última toma de datos del estudio objeto de este proyecto. Estos ensayos consisten en superar el escalón que se muestra en la figura 6.6. La velocidad que un vehículo adquiriría para superar un escalón será superior o igual a 20 km/h. Por ello, el valor de velocidad escogido para realizar este ensayo varía en torno a los 20 km/h. En cuanto a la variación de tensión del amortiguador, se ha seguido el mismo criterio que en el ensayo sobre badén, es decir, se han tomado los valores de 0,1 2.5 y 5 V.



Figura 6.6. Ensayo sobre escalón.

A continuación, en el capítulo 7, se muestran los resultados obtenidos en la realización de los ensayos descritos sobre terrenos adoquinado, badén y escalón.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado, se evalúan los datos obtenidos en los ensayos descritos en el capítulo anterior. Previamente, se obtiene el *Power Spectral Density* (PSD) de la señal procedente de los sensores de desplazamiento para realizar un estudio en frecuencia y así decidir si es necesario el uso de un filtro de paso bajo, un filtro de paso alto o, por el contrario, no se requiere ningún tipo de filtro. El estudio en frecuencia, normalmente, se ve afectado por la generación de ruido a altas frecuencias.

El ensayo realizado sobre badén es el más agresivo para el amortiguador. Por este motivo se decide realizar un ensayo sobre badén para filtrar los datos obtenidos y adquirir el PSD de la señal original correspondiente a los mismos (véase figura 7.1). La figura 7.1 muestra que el estudio en frecuencia realizado no está afectado por la generación de ruido, lo cual se demuestra mediante el empleo de un filtro de paso bajo de tipo *Butterworth*, cuya frecuencia de corte es 10^2 rad/s, que muestra la superposición de las dos ondas, tanto de la señal original procedente de la lectura de los sensores como por el filtrado de estos datos (véase figura 7.2).

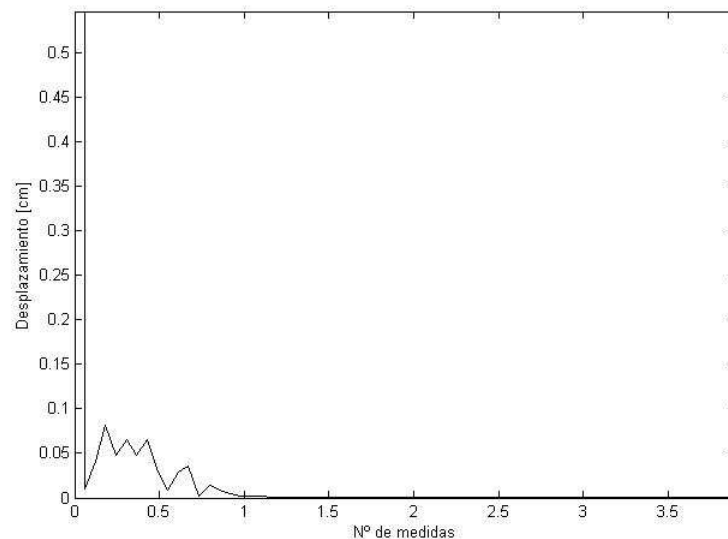


Figura 7.1. PSD de la señal original en el ensayo en badén.

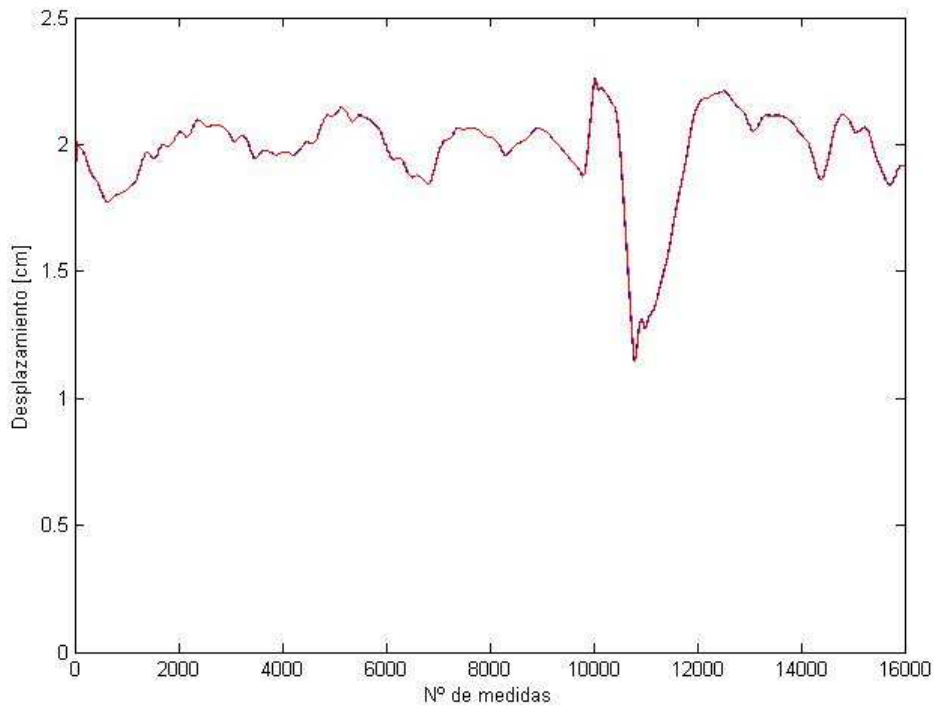


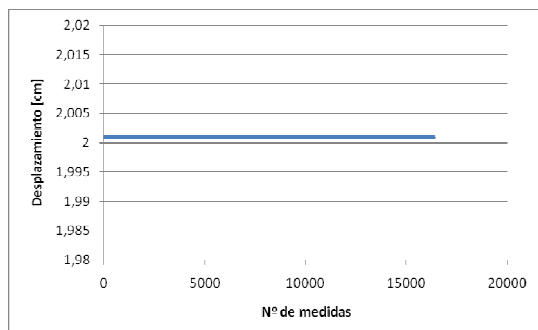
Figura 7.2. Comparación entre señal original y filtrada del ensayo previo en badén mediante filtro Butterworth.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre adoquinado, badén y escalón a las distintas velocidades y tensiones de alimentación.

7.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO a 20 km/h

Las figuras 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6 muestran los resultados obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a una velocidad constante de 20 km/h cuando se alimenta al amortiguador MR con una tensión de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

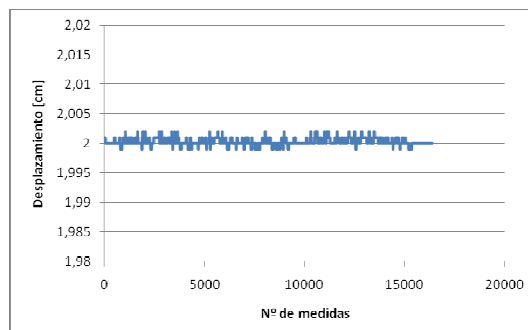
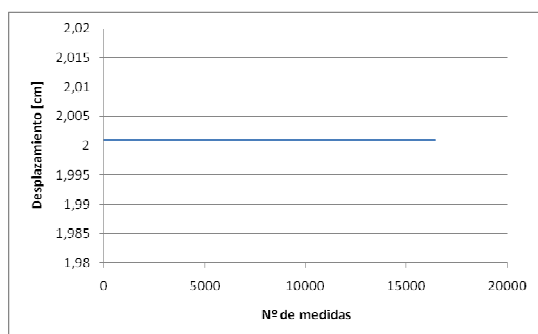


Figura 7.3. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

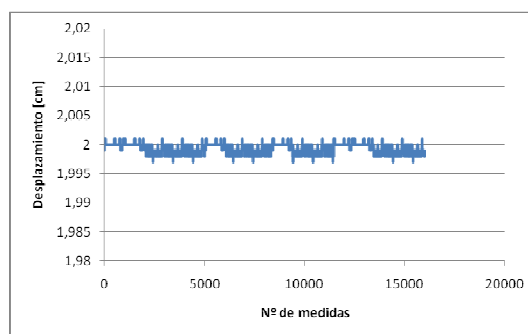
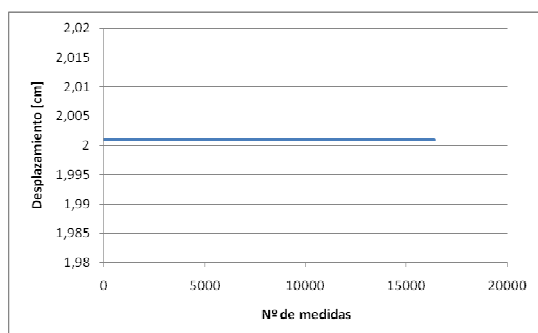


Figura 7.4. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

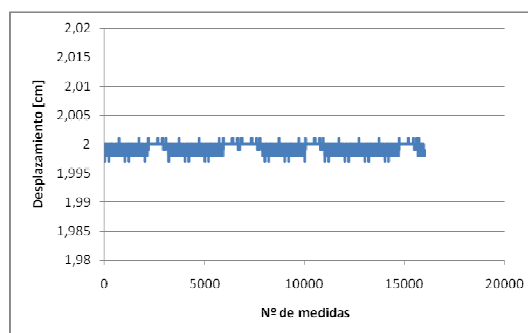
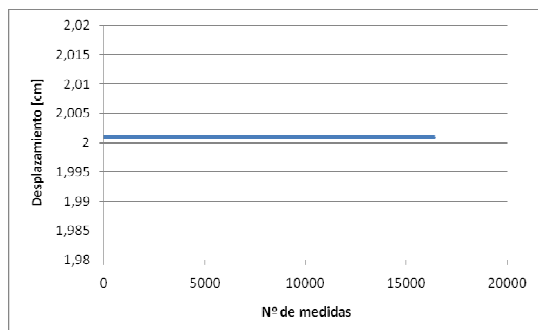


Figura 7.5. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

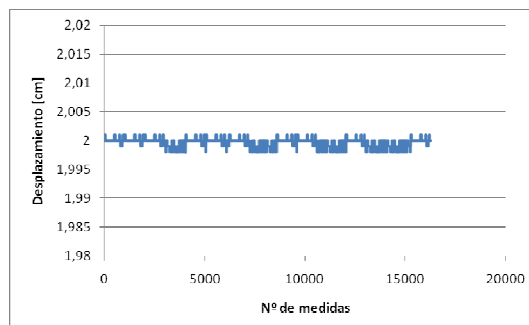


Figura 7.6. Resultados sobre adoquinado a 20 km/h-5 V.

7.2.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.1 muestra la comparación entre el amortiguador convencional (izquierdo) y el magneto-reológico (derecho) de los valores RMS cuando se alimenta al amortiguador MR con los diferentes valores de tensión.

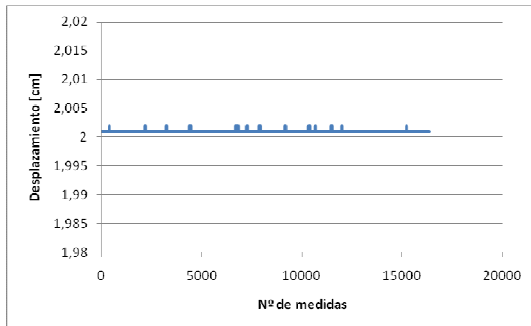
Tabla 7.1. Valores RMS de los ensayos sobre adoquinado a 20 km/h.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99919269
Izquierdo	2,001	2,001	2,001	2,001

7.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO a 30 km/h

Las figuras 7.7, 7.8, 7.9 y 7.10 muestran los resultados obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a una velocidad constante de 30 km/h cuando se alimenta al amortiguador MR con una tensión de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

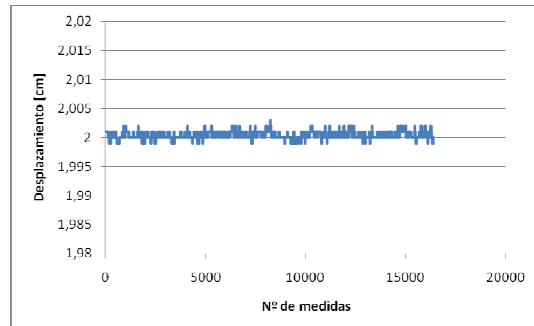
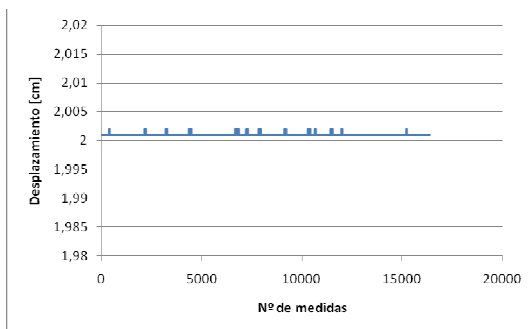


Figura 7.7. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

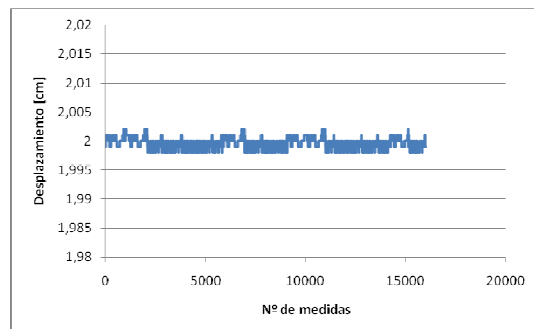
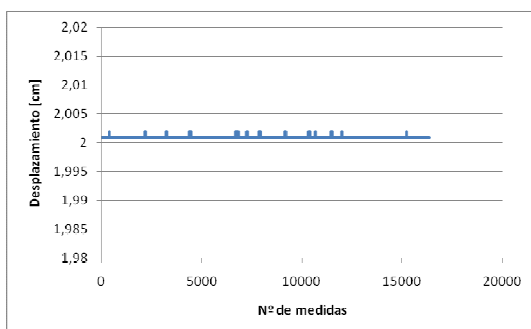


Figura 7.8. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

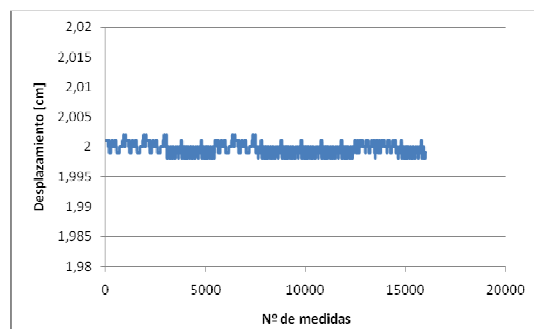
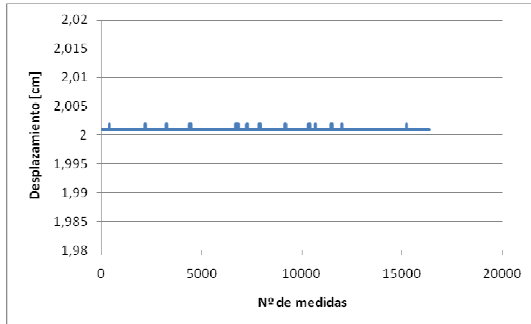


Figura 7.9. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

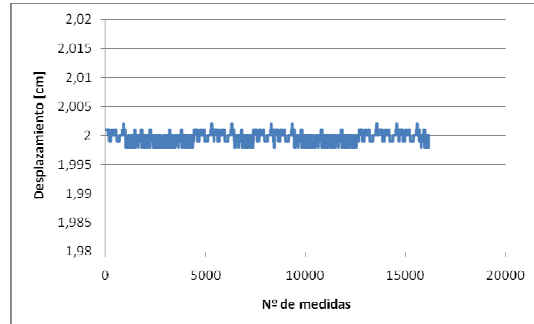


Figura 7.10. Resultados sobre adoquinado a 30 km/h-5 V.

7.3.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.2 muestra la comparación entre el amortiguador convencional (izquierdo) y el magneto-reológico (derecho) de los valores RMS cuando se alimenta al amortiguador MR con los diferentes valores de tensión.

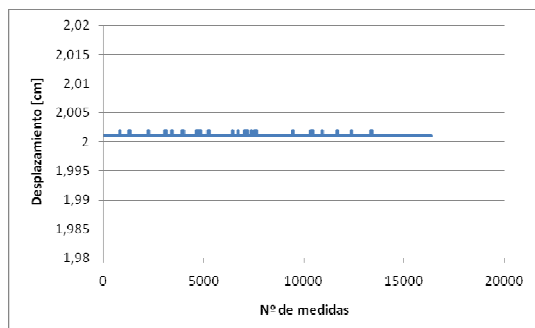
Tabla 7.2. Valores RMS de los ensayos sobre adoquinado a 30 km/h.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00032776	1,99952846	1,999507	1,99954853
Izquierdo	2,001012207	2,001012207	2,001012207	2,001012207

7.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO a 40 km/h

Las figuras 7.11, 7.12, 7.13 y 7.14 muestran los resultados obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a una velocidad constante de 40 km/h cuando se alimenta al amortiguador MR con una tensión de 0, 1, 2.5 y 5, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

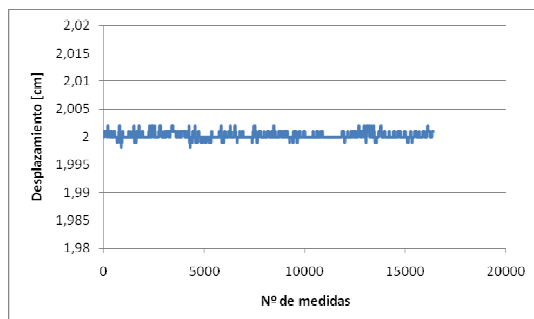
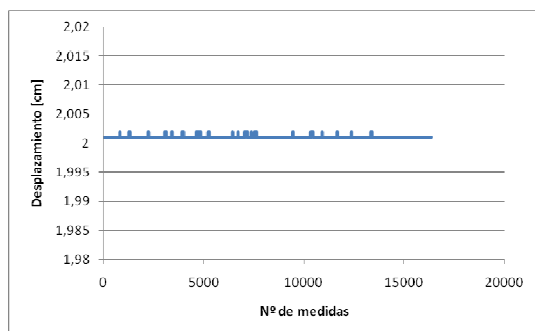


Figura 7.11. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

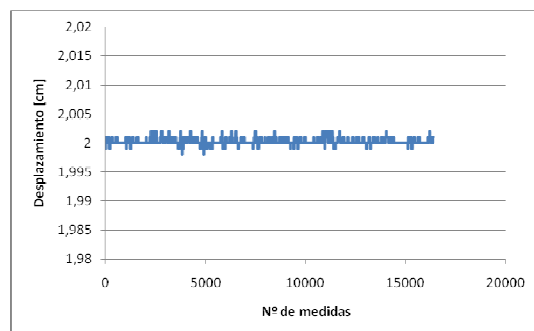
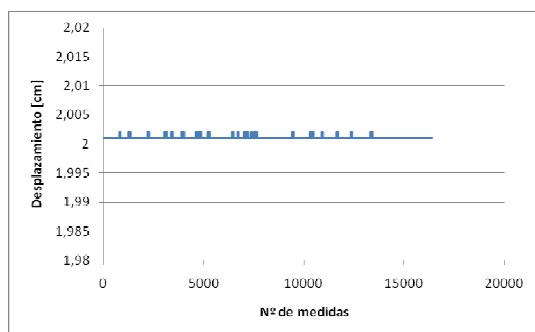


Figura 7.12. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

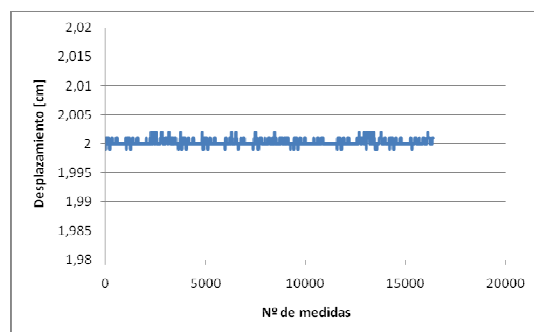
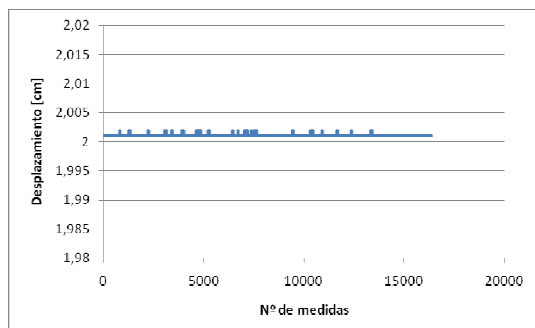


Figura 7.13. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

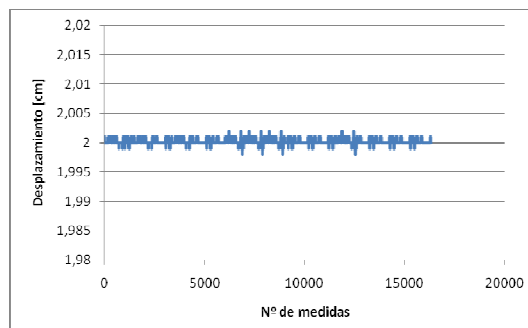


Figura 7.14. Resultados sobre adoquinado a 40 km/h-5 V.

7.4.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.3 muestra la comparación entre el amortiguador convencional (izquierdo) y el magneto-reológico (derecho) de los valores RMS cuando se alimenta al amortiguador MR con los diferentes valores de tensión.

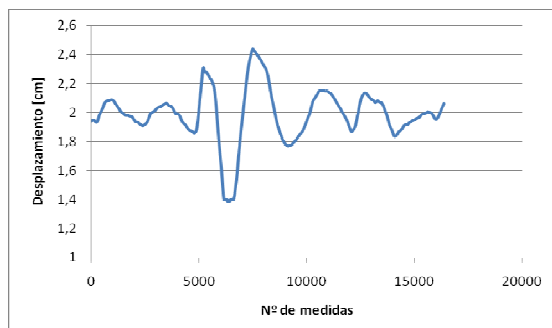
Tabla 7.3. Valores RMS de los ensayos sobre adoquinado a 40 km/h.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,00029126	2,00027045	2,00022688	1,999
Izquierdo	2,00133569	2,00133569	2,00133569	2,00133569

7.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN

Las figuras 7.15, 7.16, 7.17 y 7.18 muestran los resultados obtenidos en el ensayo sobre badén a una velocidad constante de 20 km/h cuando se alimenta al amortiguador MR con una tensión de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

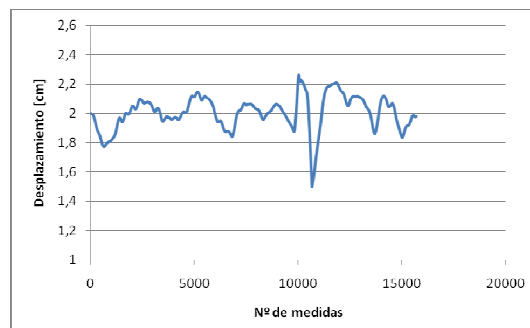
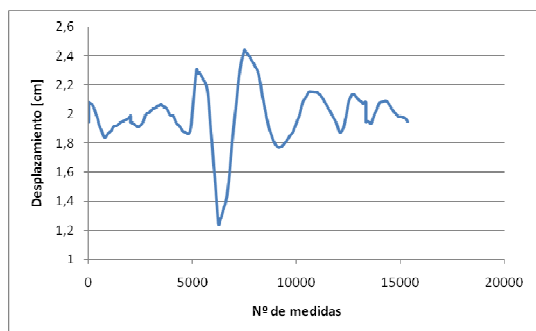


Figura 7.15. Resultados sobre escalón a 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

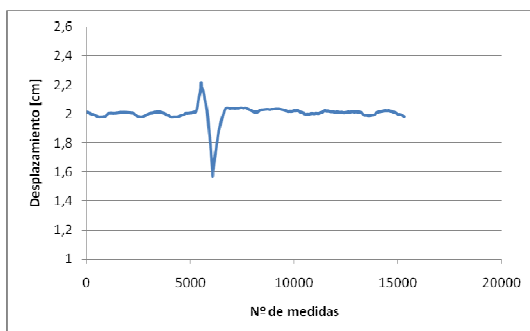
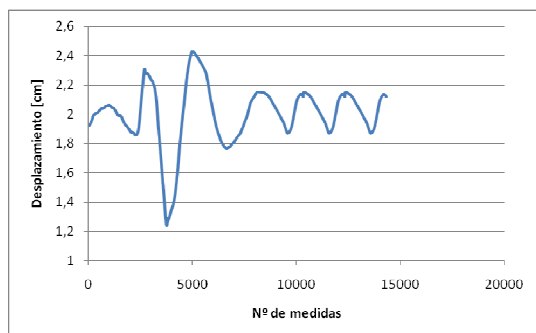


Figura 7.16. Resultados sobre escalón a 1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

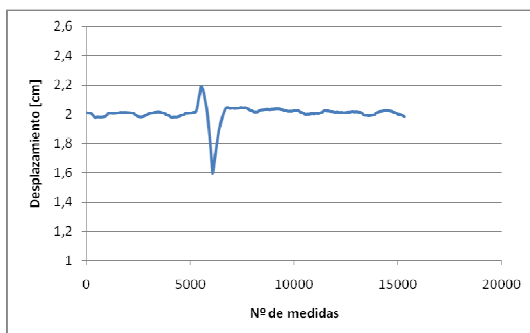
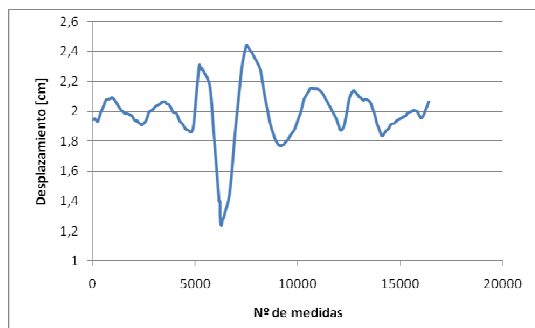


Figura 7.17. Resultados sobre escalón a 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

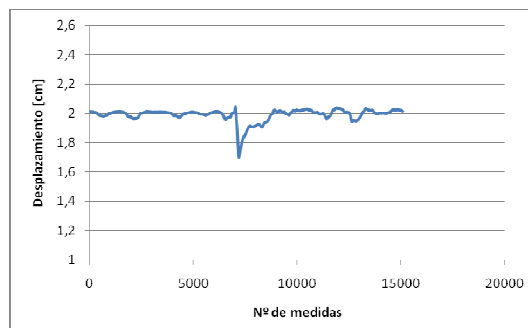


Figura 7.18. Resultados sobre escalón a 5 V.

7.5.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.4 muestra la comparación entre el amortiguador convencional (izquierdo) y el magneto-reológico (derecho) de los valores RMS cuando se alimenta al amortiguador MR con los diferentes valores de tensión.

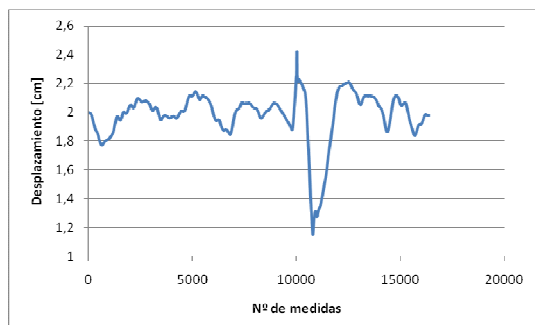
Tabla 7.4. Valores RMS de los ensayos sobre escalón.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	2,005094698	2,00493285	2,004876289	1,991782101
Izquierdo	1,989462891	1,986793832	2,002233092	1,987386047

7.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN

Las figuras 7.19, 7.20, 7.21 y 7.22 muestran los resultados obtenidos en el ensayo sobre escalón a una velocidad constante de 20 km/h cuando se alimenta al amortiguador MR con una tensión de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

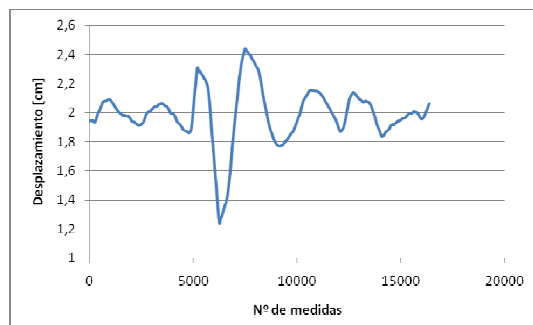
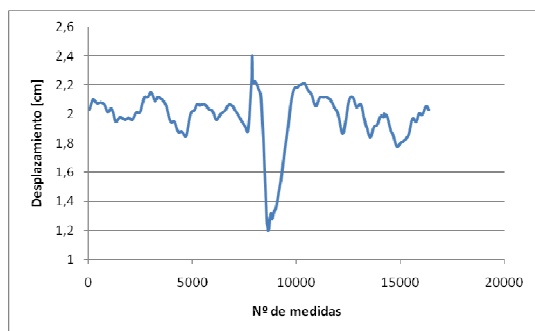


Figura 7.19. Resultados sobre badén a 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

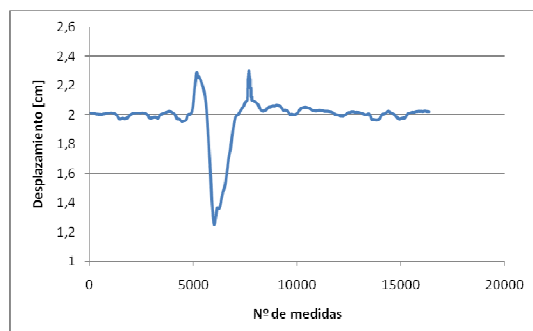
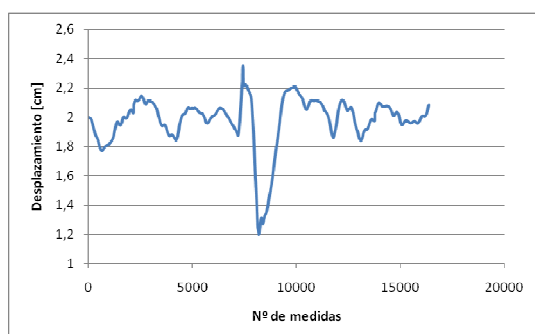


Figura 7.20. Resultados sobre badén a 1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

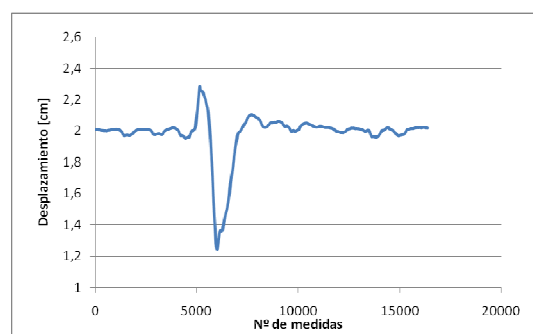
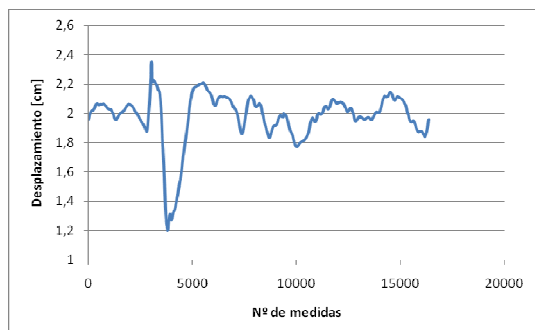


Figura 7.21. Resultados sobre badén a 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

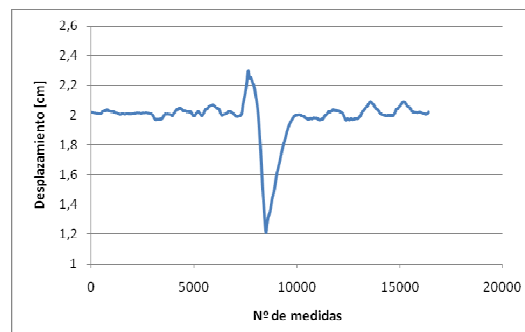


Figura 7.22. Resultados sobre badén a 5 V.

7.6.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.5 muestra la comparación entre el amortiguador convencional (izquierdo) y el magneto-reológico (derecho) de los valores RMS cuando se alimenta al amortiguador MR con los diferentes valores de tensión.

Tabla 7.5. Valores RMS de los ensayos sobre badén.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Derecho	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063
Izquierdo	1,97334375	1,97697107	1,97691461	1,97688512

La tabla 7.6 muestra los valores RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 7.6. Comparación del valor RMS del amortiguador MR en los distintos ensayos.

RMS	0 V	1 V	2,5 V	5 V
Badén	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063
Escalón	2,005094698	2,00493285	2,004876289	1,991782101
Adoquinado 20 km/h	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99919269
Adoquinado 30 km/h	2,00032776	1,99952846	1,999507	1,99949853
Adoquinado 40 km/h	2,00029126	2,00027045	2,00022688	1,999

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

8.1 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el amortiguador magneto-reológico, utilizado para los ensayos, fue fabricado para los asientos de vehículos de gran tonelaje, puede darse el caso de que algunas medidas no sean estrictamente correctas, debido a que la carrera del vástago tiene muy poco recorrido y puede llegar al tope muestreando unos datos no del todo verdaderos.

Estudiando los valores RMS del amortiguador magneto-reológico obtenidos en los diferentes apartados del capítulo 7, se puede observar que, a medida que aumenta la tensión de alimentación del amortiguador, el desplazamiento del sensor de desplazamiento disminuye. Esto significa que el amortiguador MR se endurece. Por otro lado, a medida que se aumenta la velocidad del vehículo automóvil en un mismo terreno, los valores RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico obtenidos también aumentan, es decir, que dicho amortiguador experimenta un mayor desplazamiento.

Por otro lado, en los ensayos de badén se obtiene el mismo comportamiento que sobre terreno adoquinado, es decir a medida que se aumenta la tensión del amortiguador magneto-reológico, los valores correspondientes del RMS disminuyen.

En cuanto a los datos del amortiguador convencional, obtenidos de igual manera en el capítulo 7, se puede observar que son independientes de la variación de la tensión del amortiguador magneto-reológico, ya que su comportamiento se mantiene constante a lo largo de los ensayos. Hay que destacar que lo que sí puede influir es el comportamiento de uno de los lados del vehículo en el otro lado como consecuencia del movimiento de balanceo. En este caso, al obtener los mismos valores en el amortiguador convencional, se puede deducir que prácticamente no influye este movimiento, lo cual es justificable debido a las bajas velocidades y a los pequeños obstáculos a los que se ha visto sometido el vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto. Gracias a esta conclusión, se puede afirmar que la toma de datos es correcta.

Entre los valores RMS adquiridos se obtienen datos atípicos, estos están reflejados en el ensayo sobre badén, en el cual los datos del RMS van aumentando a medida que se aumenta la tensión del amortiguador magneto-reológico en lugar de disminuir. Esto puede ser debido por una variación de la velocidad al rebasar este obstáculo, ya que es prácticamente imposible mantener una velocidad constante según se rebasa el badén.

8.2 FUTUROS DESARROLLOS

Las diversas aplicaciones y propiedades de los fluidos reológicos adquieren una gran importancia dentro de la industria y de la automoción gracias al fuerte desarrollo que están experimentando dichos fluidos.

En el presente proyecto se ha estudiado el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión delantera de un vehículo automóvil. Los futuros estudios que se pueden emprender a partir de este proyecto son:

- Un estudio más exhaustivo adaptando en el vehículo un amortiguador magneto-reológico fabricado específicamente para este y no utilizando el del asiento de un vehículo de gran tonelaje como ha sido el caso.
- Realizar un estudio adaptando el amortiguador magneto-reológico en la suspensión trasera del vehículo.
- Realizar un estudio adaptando este tipo de amortiguadores a la suspensión trasera y delantera ambas simultáneamente.
- Un estudio más avanzado del presente proyecto realizando ensayos sobre otros tipos de terrenos, al igual que realizar ensayos a mayor velocidad sobre carreteras.
- Ampliar la investigación sobre fluidos reológicos y darle más aplicaciones a la adaptación de elementos con este tipo de fluidos en los vehículos automóviles.

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

A.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se procede a detallar las especificaciones técnicas de cada equipo empleado en el desarrollo del presente proyecto. A continuación se detallan las especificaciones del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio, así como las características de los equipos PXI de National Instruments empleados para la adquisición y tratamiento de datos.

A.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 DE LORD

El amortiguador RD-1005.3 es un tipo de amortiguador con fluido magneto-reológico fabricado por la empresa alemana Lord. En el interior del monotubo se le aplica al fluido un campo magnético que hace que varíe sus características. Las características de amortiguamiento del fluido incrementan con prácticamente infinita precisión y con un tiempo de respuesta de 25ms. Diseño de control simple, liso y funcionamiento silencioso, este tipo amortiguador es especialmente apropiado para aplicaciones de suspensión. En la tabla A.1 se incluyen las características más importantes del amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 fabricado por la empresa Lord.

Tabla A.1. Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord

Longitud en compresión	6,1 pulgadas (155mm)
Longitud en extensión	8,2 pulgadas (255mm)
Diámetro del amortiguador	1,63 pulgadas (41,4mm)
Diámetro vástago Shaft	0,39 pulgadas (10mm)
Peso	1,8 libras (800g)
Para la instalación del Pin	0,47 pulgadas (12mm)
Características eléctricas	
Amperios de salida	Máximo 2 amperios
Voltaje de salida	12 V DC

ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Resistencia Temperatura ambiente Resistencia (a 160°F 71° C)	5 ohm 7 ohm
Fuerza del amortiguador (<i>peak to peak</i>) 2 pulgadas/segundos 1 amperio 8 pulgadas/segundo 0 amperio	>500 libras (2224 N) <150 libras (667 N)
Características mecánicas Mínima Fuerza de tensión Máximo rango de operación Temperaturas límite de Almacenamiento	1000 libras (4448 N) 160°F (71° C) 212°F a -40°F (100 °C a 40° C)
Durabilidad	2 millones de ciclos @ +/- 0,5 pulgadas (+/-13mm), 2 hercios con salida de corriente variable entre 0 y 0,8 amperios.
Tiempo de respuesta	< 25 ms – tiempo para alcanzar el 90% del máximo niveles desde 0 a 1 amperio con pasos de @ 2 pulgadas/segundo (51 mm/s)
Conector amortiguador (2 pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-2023 Pins: Modelo 02-06-2103
Conector de unión (2pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-1023 Pins: Modelo 02-06-1103

En la figura A.1 se muestra una gráfica que muestra fuerza (N) frente a velocidad (m/s) del amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 de Lord.

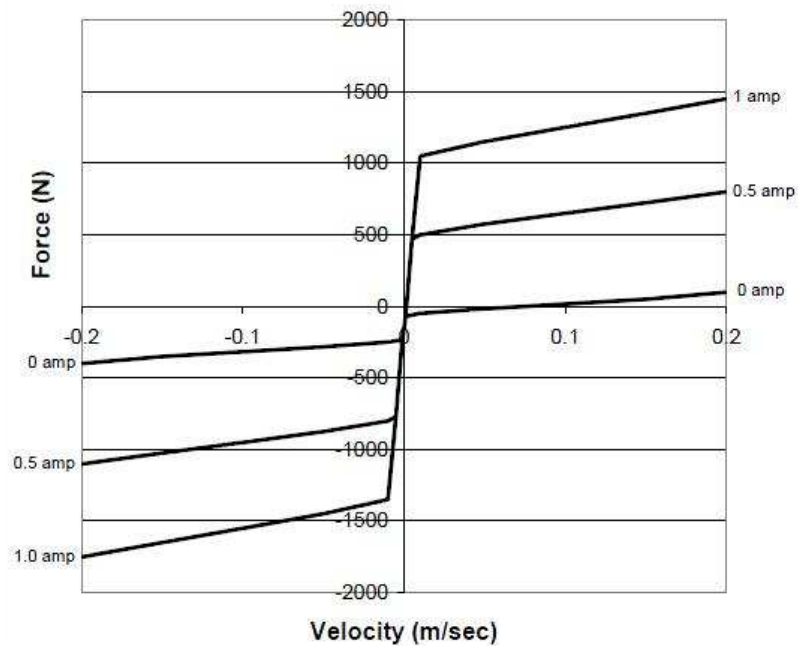


Figura A.1. Gráfica Fuerza vs Velocidad del amortiguador RD-1005.3.

La figura A.2 muestra las vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio.

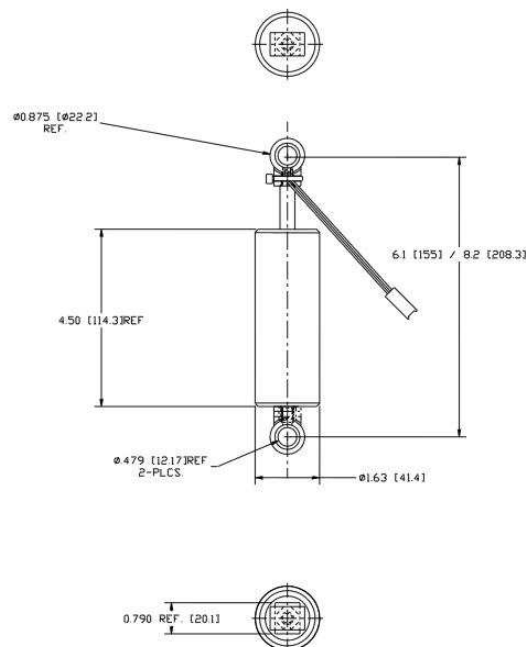


Figura A.2. Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico.

A.3 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS NATIONAL INSTRUMENTS

A continuación se detallan las especificaciones de los equipos de National Instruments. Como se comentó en el capítulo 4, el equipo NI PXI 1031 DC consiste en un chasis portátil con cuatro ranuras. Por otro lado, los módulos NI PXI 6230 y NI PXI 4472 B ya se comentó que consisten en tarjetas de adquisición de datos.

A.3.1 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 1031 DC

Electrical

AC Input

Input voltage range	100 to 120 VAC/200 to 240 VAC
Operating voltage range	90 to 132 VAC/180 to 264 VAC
Input frequency	50/60 Hz
Operating frequency range	47 to 63 Hz
Input current rating	4 to 2 A
Overcurrent protection	6.3 A fuse in power supply (no user-serviceable components inside)
Efficiency	65% minimum

DC Input

Input voltage range	11 to 30 VDC
Input current rating	30 A maximum
Efficiency	65% typical

DC Output

DC Current Capacity (I_{max} , 0 to 50° C)

Voltage (V)	Current (A)
+3.3	12
+5	17
+12	2
-12	0.8

Notes

¹For AC-powered applications and DC applications above 12.3 V input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

²For AC/DC applications, the combined loading on the +5 and +3.3 VDC must not exceed 112 W.

³For DC-powered applications, at 11 VDC input the combined loading on +5, +3.3, +12, and -12 VDC must not exceed 137 W. At 12.3 VDC or higher input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

⁴For DC applications, the output power is derated 5 W/°C above 45 °C.

⁵National Instruments does not guarantee measurement accuracy for brief periods when switching between AC and DC input.

Chassis Cooling

Per-slot cooling capacity	25 W
Fan	86 cfm

Acoustic Emissions

Sound pressure level (at operator's position)
(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	45.5 dBA
High Fan	49.4 dBA

Sound Power

(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	54.3 dBA
High Fan	58.2 dBA

ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Environmental

Operating location	Indoors
Altitude	2,000 m
Installation category	II
Pollution degree.....	2

Operating Environment

Operating temperature	0 to 50 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	10 to 90% (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Storage Environment

Ambient temperature.....	-20 to 70 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Shock and Vibration

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (tested in accordance with IEC-60068-2-27; test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Random Vibration

Operating	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (tested in accordance with IEC-60068-2-64; nonoperating profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3)

Mechanical

Overall dimensions (standard chassis)	
Height	177 mm (6.97 in.)
Width	257.1 mm (10.12 in.)
Depth.....	212.8 mm (8.38 in.)
Weight	5.0 kg (11.0 lb)

A.3.2 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 4472 B

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels	
NI 4472 Series	8, simultaneously sampled
NI 4474 Series	4, simultaneously sampled
Input configuration	Unbalanced differential
Resolution	24 bits, nominal
Type of ADC	Delta-sigma
Oversampling, for sample rate (f_s):	
1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s	128 f_s
51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s	64 f_s
Sample rates (f_s)	1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s > 51.2$ kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq 51.2$ kS/s
Frequency accuracy	± 25 ppm
Input signal range	± 10 V peak
FIFO buffer size	1,024 samples
Data transfers	DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC)	± 3 mV, max
Gain (amplitude accuracy)	± 0.1 dB, max, $f_{in} = 1$ kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)	
Positive input	1 M Ω in parallel with 60 pF
Negative input (shield)	50 Ω in parallel with 0.02 μ F
Flatness (relative to 1 kHz)	± 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled
-3 dB bandwidth	0.4863 f_s
Input coupling	AC or DC, software-selectable
AC -3 dB cutoff frequency	
NI 4472, NI 4474	3.4 Hz
NI 4472B	0.5 Hz
Overvoltage protection	
Positive input	± 42.4 V
Positive inputs protected	CH<0..7>
Negative input (shield)	Not protected, rated at ± 2.5 V
Common-mode rejection ratio (CMRR)	
$f_{in} < 1$ kHz	> 60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband)	DC (0 Hz) to 0.4535 f_s
Stop band	0.5465 f_s
Alias rejection	110 dB
Spurious-free dynamic range	130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s

118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s THD, $f_{in} = 1$ kHz	
0 dBFS input	< -90 dB
20 dBFS input	< -100 dB
60 dBFS input	< -60 dB
IMD	< -100 dB (CCF 14 kHz + 15 kHz)
Crosstalk [®] (channel separation), $f_{in} = 0$ to 51.2 kHz	
Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7	
Shorted input	< -90 dB
1 k Ω load	< -80 dB
Other channel combinations	
Shorted input	< -100 dB
1 k Ω load	< -90 dB
Phase linearity	± 0.5 deg
Interchannel phase mismatch	$< f_{in}$ (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 deg
Interchannel gain mismatch	± 0.1 dB
Filter delay through ADC	38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level	5.000 V ± 2.5 mV
Temperature coefficient	± 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Long-term stability	± 20 ppm/ \sqrt{t} , 1,000 h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)	
Current	4 mA, $\pm 5\%$
Compliance	24 V
Output impedance	> 250 k Ω at 1 kHz
Current noise	< 500 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Triggers

Analog Trigger

Source	CH<0..7>
Level	-10 to +10 V, full scale, programmable
Slope	Positive or negative (software-selectable)
Resolution	24 bits, nominal
Hysteresis	Programmable

Digital Trigger

Compatibility	5 V TTL/CMOS
Response	Rising or falling edge
Pulse width	10 ns, minimum
Bus Interface	
Type	Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC	
PXI	400 mA, maximum
+5 VDC	
PXI	2.6 A, maximum
PXI	2.2 A, maximum
+12 VDC	120 mA, maximum
-12 VDC	120 mA, maximum

A.3.3 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 6230

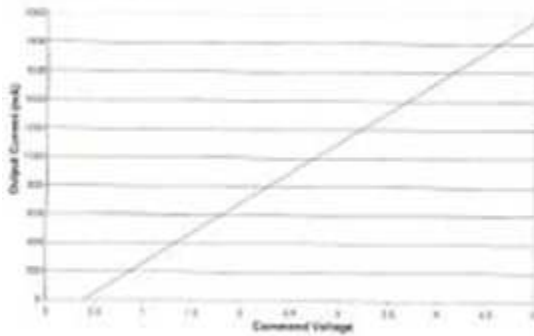
Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input	
Number of channels	4 differential or 8 single ended
Channel type	Voltage input
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy Table
Sampling rate	
Maximum	250 KS/s
Minimum	0 S/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC
Input range	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V
Maximum working voltage for analog inputs	Refer to the Maximum Working Voltage section
CMRR (DC to 60 Hz)	95 dB (with respect to AI GND)
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	±100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Overvoltage protection (AI <0..7> with respect to AI GND)	
Device on	±25 V for up to two AI pins
Device off	±15 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	±20 mA max/AI pin
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
±90 ppm of step (±6 LSB)	4 μs convert interval
±30 ppm of step (±2 LSB)	5 μs convert interval
±15 ppm of step (±1 LSB)	7 μs convert interval

A.4 ESPECIFICACIONES DEL KIT CONTROLLER

LORD USER INSTRUCTIONS

Typical Performance, 4 ohm load



Performance graph should not be used for control or design purposes

The tables below indicate typical performance using the supplied power supply. When utilizing the Wonder Box device controller kit in a control circuit, it is recommended that the user measure the exact voltage to current relationship in their application.

Input Voltage	Output Current (4 ohm)
-0.4-0.6 V	0 mA
2 V	700 mA
4.3 V	1800 mA

Input Voltage	Output Current (8 ohm)
-0.4-0.6 V	0 mA
1.6 V	600 mA
3.2 V	1300 mA

REFERENCIAS

- [1] FERNÁNDEZ CASAS, Raúl. “Modelado de un sistema de suspensión de un vehículo automóvil mediante Simmechanics”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2008.
- [2] Aparicio Izquierdo, F., Vera Álvarez, C., Díaz López, V. “Teoría de los vehículos automóviles”. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 1995.
- [3] Información general de la suspensión. 2010.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html#suspension
- [4] Tipos de suspensiones. 2010.
<http://www.automovilistas-chile.cl/forum/topic.asp>
- [5] SÁNCHEZ CASTILLO, Noemí. “Control de un sistema de suspensión semiactiva basado en lógica difusa: modelo de vehículo completo”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2006.
- [6] Sistemas de suspensión. Elementos del automóvil. Cesmivap. 2010.
<http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/CFElemAutomoviblesExtract.pdf>
- [7] J. Alberdi. Manuales de automoción. Universidad de Navarra. Enero de 2003.
<http://www.tecnun.es/automoción/>
- [8] CHACÓN HERNANDO, Víctor. “Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [9] PICHARDO, Juan Manuel. Tipos de suspensión independiente. 2010.
<http://www.km77.com/tecnica/bastidor/clasificacion-suspension/t01.asp>.
- [10] CUPICH RODRIGUEZ, M. y ELIZONDO GARZA, F. J. Amortiguadores magnetoreológicos. V Congreso Mexicano de Acústica. 1998.
- [11] Prof. Dr. BREGNI, CARLOS. Reología. Departamento de Tecnología Farmacéutica, Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. 2010.

REFERENCIAS

- [12] ÁLVAREZ ESTEBAN, Carlos. "Estudio y modelado de una amortiguador magneto-reológico mediante aprendizaje incremental" Directores: M^a Jesús López Boada, José Antonio Calvo Ramos. Universidad Carlos III de Madrid. 2007.
- [13] LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa. Materiales inteligentes I/II. 1^a parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad. 2004.
- [14] REJÓN G., Leonardo, LÓPEZ G., Francisco, MONTOYA T., Gerardo y MANERO B., Octavio. Fluidos electroreológicos. Boletín IIE, Enero-Marzo 2003. Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM.
- [15] IGLESIAS, Guillermo. Estabilidad de suspensiones magnéticas concentradas. Grupo de Física de Interfases y Sistemas Coloidales, Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Granada
- [16] Estructura fluidos MR DOMÍNGUEZ-GARCÍA, P, Pastor, J. M, MELLE , Sonia y. RUBIO, M. A. Microestructura de una suspensión magneto-reológica depositada. Laboratorio de Sistemas Complejos. Dpto. Física Fundamental. Facultad de Ciencias UNED.
- [17] José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sebastiá. Labview entorno gráfico de programación. Alfaomega marcombo.
- [18] Página Web Oficial National Instruments. Enlace web: <http://www.ni.com>
- [19] Información sobre amortiguadores Bilstein. Applied measurements LTD. Transducer Specialists 2010. Enlace web:e <http://appmeas.co.uk/aml-ie-industrial-lvdt-displacement-sensor-html>.

